

**Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektroniky a informatiky**

**Katedra telekomunikační techniky**

**Problematika amplitudových diodových modulátorů**  
**(Problems of amplitude diode modulators)**

**Student: Michal Čajnák**

**Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Libor Gajdošík**

**Studijní obor: Elektronika a sdělovací technika**

**Datum zadání bakalářské práce: 30.11.2008**

**Termín odevzdání bakalářské práce: 07.05.2009**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě .....

Podpis studenta

## Abstrakt

ČAJNÁK, Michal: Problematika amplitudových diodových modulátorů [Bakalářská práce] – Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektroniky a informatiky; Katedra telekomunikační techniky. – Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Gajdošík – Ostrava 2009.

Cílem bakalářské práce bylo objasnit problémy amplitudových diodových modulátorů a podrobnou strukturu samotné amplitudové modulace. Práce je rozdělená do jedenácti částí. První část obsahuje úvod. Druhá část je věnována rozdělení do druhů s popisem základních rozdílů. Třetí kapitola je věnována objasnění základních pojmů amplitudová modulace s nosnou vlnou, čtvrtá kapitola amplitudové modulace s potlačenou nosnou vlnou. Pátá část se zabývá problematikou jednopásmové modulace a způsoby jejího vytvoření. Mezi hlavní patří část šest, která rozebírá základní realizaci a diodové modulátory. V dalších částech je obsaženo použití se způsobem demodulace. Devátá kapitola je praktická realizace amplitudových diodových modulátorů, měření jejich převodních charakteristik a simulace amplitudové modulace. A celému porovnání naměřených a simulovaných výsledků. Desátá část se zabývá základním prvkem, čímž je dioda, a také jejím vhodným výběrem pro použití v modulátorech. Zhodnocení cílů a závěr celé bakalářské práce se nachází v poslední jedenácté části.

**Klíčová slova:** amplitudové diodové modulátory, amplitudová modulace s nosným signálem, amplitudová modulace s redukováným nosným signálem, demodulace, dioda, dvoucestný diodový modulátor, hloubka modulace, jednocestný diodový modulátor, kruhový diodový modulátor, jednopásmová amplitudová modulace, dvoupásmová amplitudová modulace, modulační koeficient.

## **Abstract**

ČAJNÁK, Michal: Problems of amplitude diode modulators [Baccalaureate work] – VŠB - Technical University of Ostrava. Faculty of Electrical Engineering and Compu; Department of Telecommunications. – Supervisor: Dr. Ing. Libor Gajdošík – Ostrava 2009.

The main purpose of my baccalaureate work was concerned about the explanation of the problems of amplitude diode modulators, and also about the detailed structure of substantial amplitude modulation. My work is divided into eleven parts. The first part contains the introduction. The second part is addicted to division of the kinds with detailed discription of the main differences. The third part refers about the basic conception of amplitude modulation with dual side band, and the fourth part about the basic conception of amplitude modulation with reduced carrier band. The fifth part is addicted to single side band amplitude modulation, and ways of its formation. The sixth part is one of the most importantly parts of my work, detailing the basic realisation and kinds of the amplitude modulation by amplitude diode modulators. The method of the demodulation is described in the next two chapters. The ninth part includes the basic realisation of amplitude diode modulators, measuring their transitionaly characteristic, and the simulation of amplitude modulation, and also the comparing of the measured and simulated results. The last but one part of my work describes the basic component, the diode, and also includes the description of its siutable selection for using it in the modulators. The target analysis is the pivotal mark of the part eleven.

**Keywords :** Amplitude diode modulators, Amplitude modulation with a carrier, Amplitude modulation with reduced Carrar, Demodulation, Diode, Two way diode modulators, Depth of modulation, One way diode modulators, Circular diode modulators, Single side band amplitude modulation, Dual side amplitude modulation, Modulation Rate.

**Seznam použitých symbolů a zkratek:**

$n(t)$  - harmonický nosný signál

$x(t)$  - modulační signál

$s(t)$  - modulovaný signál

$m$  - modulační koeficient

$A$  - amplituda harmonického průběhu

$V$  - vrcholová hodnota časového průběhu

$\Omega$  - úhlová frekvence

$\varphi$  - fázový posuv

# Obsah

1.	<b>Úvod</b>	(1)
2.	<b>Teorie</b>	(2)
2.1.	Druhy	(3)
3.	<b>Amplitudová modulace s nosnou vlnou</b>	(4)
3.1.	Základní vlastnosti DSB	(4)
3.2.	Modulační koeficient, Hloubka modulace	(5)
3.3.	Spektrum signálu	(5)
3.4.	Fázorové znázornění	(7)
3.5.	Výkon	(8)
4.	<b>Amplitudová modulace s redukovanou nosnou vlnou</b>	(10)
4.1.	Základní vlastnosti DSB RC	(10)
5.	<b>Jednopásmová amplitudová modulace</b>	(12)
5.1.	Základní vlastnosti SSB	(12)
5.2.	Potlačení jednoho pásma pomocí filtru	(12)
5.3.	Jednopásmová modulace s fázovou kompenzací	(13)
5.4.	Weaverova metoda jednopásmové modulace	(15)
6.	<b>Realizace</b>	(17)
6.1.	Jednocestný diodový modulátor	(18)
6.2.	Kruhový diodový modulátor	(21)
6.3.	Dvoucestný diodový modulátor	(22)
6.4.	Další modulátory	(22)
6.4.1.	Tranzistorové modulátory	(22)
6.4.2.	Krystalový modulátor	(24)
6.4.3.	S integrovaným obvodem MC1496	(24)
7.	<b>Demodulace</b>	(26)
7.1.	Demodulace s redukovanou nosnou vlnou	(26)
7.2.	Demodulace s nosnou vlnou	(28)
7.3.	Diodové demodulátory	(29)
8.	<b>Telekomunikační systémy</b>	(31)
8.1.	Rozhlasový a televizní příjem	(31)

9.	<b>Praktická část</b>	(33)
9.1.	Simulace pomocí programu LabView	(34)
9.2.	Měření amplitudové modulace na osciloskopu	(37)
9.2.1.	Měření kruhového diodového modulátoru	(38)
9.2.2.	Měření jednocestného diodového modulátoru	(39)
9.2.3.	Měření dvoucestného diodového modulátoru	(40)
9.3.	Porovnání simulovaných a naměřených charakteristik	(42)
10.	<b>Dioda</b>	(46)
10.1.	Základní vlastnosti	(46)
10.2.	Druhy	(46)
10.3.	Frekvenční závislost modulačních diod - naměřené průběhy a vhodnost použití pro amplitudové modulátory	(47)
11.	<b>Závěr</b>	(49)
	<b>Literatura</b>	(52)

## Seznam příloh

Příloha 1.	CD s vytvořenou simulací modulace do programu LabView a obrázky jednotlivých grafů získané tisknutím z osciloskopu.
------------	---

## 1. Úvod

V této bakalářské práci rozebírám jeden ze způsobů amplitudové modulace. Použitím amplitudových diodových modulátorů. Teorii celé amplitudové modulace včetně matematického popisu. Potřebné vztahy pro šířku pásma, jednotlivých výkonů. Realizace amplitudové modulace pomocí několika druhů modulátorů. Praktické zapojení a měření na třech diodových modulátorech a porovnání s teoretickými předpoklady a výsledky simulované modulace na PC.

Amplitudová modulace je analogová lineární modulace.

Snažíme se nízko frekvenční modulační signál přenést na větší vzdálenosti, ale k tomu je mnohem přijatelnější použít vysoko frekvenční signál. Modulace je proces, který nám z nízko frekvenční signálu vytvoří vysoko frekvenční signál.

V procesu analogové modulace vystupuje nosný signál ve tvaru harmonického průběhu. Podle toho, který z parametrů nosného signálu se mění úměrně s modulačním signálem, rozlišujeme různé druhy modulace.

*Lineární modulace* – proces, ve kterém dochází k pouhému frekvenčnímu posunutí spektra signálu. Modulovaný signál obsahuje pouze ty frekvenční složky, které odpovídají posunutým složkám modulačního signálu, a žádné jiné neobsahuje. Mezi tento druh patří amplitudová modulace.

*Nelineární modulace* – proces, ve kterém vznikají nové frekvenční složky, které nejsou obsaženy v modulačním signálu. Je typický pro frekvenční a fázovou modulaci.

Zvláštní typ analogové modulace je případ, kdy modulační signál je diskretní (datové signály, dálkopis atd.). Modulaci v tomto případě nazýváme klíčování nebo manipulace. (název klíčování pochází z telegrafní techniky, kdy se používá telegrafní klíč)

## 2. Teorie

Amplitudová modulace (AM) je proces, při kterém modulační nf signál  $x(t)$  ovlivňuje amplitudu harmonického nosného vf signálu. Výsledná amplituda  $a(t)$  modulovaného signálu bude proměnlivá v čase a bude lineární funkcí modulačního signálu.

$$a(t) = A + x(t) = A[1 + mx_n(t)] \quad (2.1)$$

$$m = \frac{V}{A}$$

Ostatní parametry nosného signálu  $\Omega$  (úhlová frekvence) a  $\varphi$  (fázový posuv) zůstávají konstantní. Amplitudově orientovaný signál bude tedy v časové oblasti popsán rovnicí.

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (2.2)$$



## 2.1. Druhy amplitudové modulace

Podle potlačení některého ze tří základních modulačních produktů můžeme rozlišovat následující druhy telekomunikačních systémů:

- **DSB** (dual side band)  
dvoupásmový systém s nosnou vlnou
- **DSB SC** (dual side band suppressed carrier)  
dvoupásmový systém s částečně potlačenou nosnou vlnou
- **DSB RC** (dual side band reduced carrier)  
dvoupásmový systém se zcela potlačenou nosnou vlnou
- **SSB** (single side band)  
jednopásmový systém s nosnou vlnou
- **SSB SC** (single side band suppressed carrier)  
jednopásmový systém s nosnou vlnou s částečně potlačenou nosnou vlnou
- **SSB RC** (single side band reduced carrier)  
jednopásmový systém s nosnou vlnou se zcela potlačenou nosnou vlnou
- systém s nesymetricky potlačeným pásmem

## 3. Amplitudová modulace s nosnou vlnou

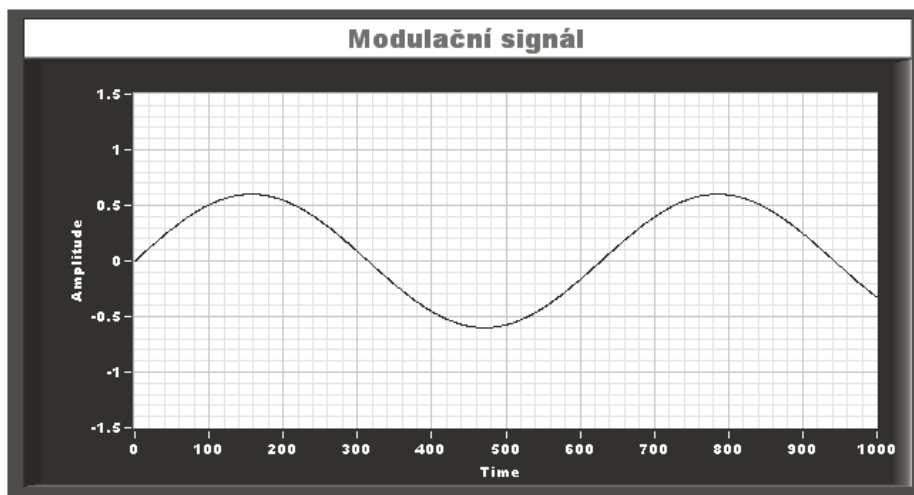
### 3.1. Základní vlastnosti

Nosný signál zůstává zachován.

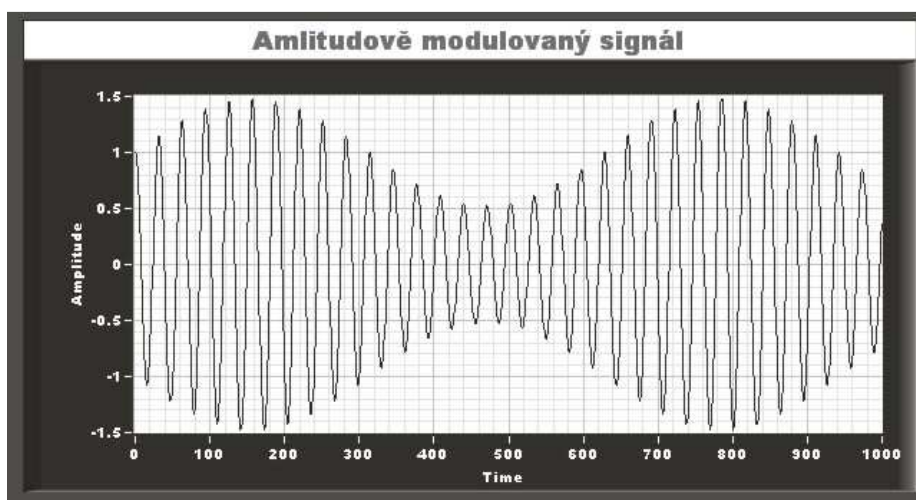
Odpovídající časový průběh signálu AM je uveden na obrázku 1. a 2.

Je zřejmé, že modulační signál  $x(t)$  tvoří obálku amplitud nosného signálu. Má-li zůstat zachován uvedený charakter signálu AM, nesmí vrcholová hodnota  $V$  modulačního signálu (přesněji jeho největší negativní hodnota) přestoupit amplitudu  $A$  nosného signálu. V případech, kdy bude  $V > A$ , nebude již obálka AM signálu shodná s modulačním signálem. To se pak projeví nelineárním zkreslením signálu získaného po modulaci (tzv. přemodulování). Podmínkou nezkrácené amplitudové modulace je vztah

$$V \leq A \text{ nebo } m = \frac{V}{A} \leq 1 \quad (3.1)$$



Obr. 1: Časový průběh signálu AM – Modulační signál



Obr. 2: Časový průběh signálu AM - Amplitudově modulovaný signál

### 3.2. Modulační koeficient, Hloubka modulace

Činitel  $m$  se nazývá „modulační koeficient“ nebo, je-li vyjádřen v procentech, „hloubka modulace“. Hloubka modulace  $m[\%]$  je úměrná intenzita (např. hlasitost) demodulovaného signálu.

Vrcholová hodnota modulovaného signálu vyplývá ze vztahu

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (3.2)$$

Pro  $x_n(t) = 1$  a bude  $(1 + m) = A$ . Její největší hodnota se vyskytne při  $m = 1$  a bude  $s_m = 2A$ .

*Příklad 3.1:*

*Jaká může být vrcholová hodnota modulačního signálu, nemá-li při amplitudě  $A = 5V$  nislého signálu hloubka modulace přestoupit 80%?*

*Vypočteme:*  $V = mA = 0,8 \cdot 5 = 4V$

Je třeba zajistit, aby vrcholová hloubka modulačního signálu  $x(t)$  nepřestoupila hodnotu  $V = 4V$ .

### 3.3. Spektrum signálu

Spektrální analýza signálu AM. Hledané spektrum dostaneme Fourierovou transformací vztahu:

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (3.2)$$

Upravený vztah:

$$s(t) = A \cos \Omega t + x(t) \cos \Omega t = s_1(t) + s_2(t) \quad (3.3)$$

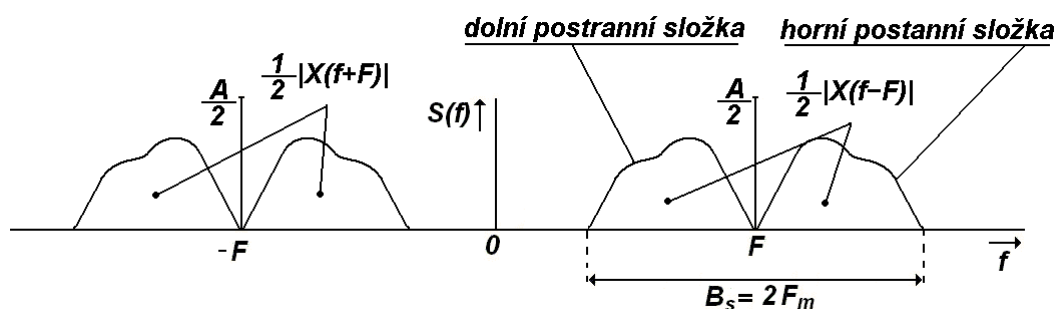
Spektrum složky  $s_1(t) = A \cos \Omega t$  (harmonický průběh) vyjádříme rovnicí je

$$s_1(f) = \frac{1}{2} A \delta(f - F) + \frac{1}{2} A \delta(f + F) \quad (3.4)$$

Což jsou dvě spektrální čáry o intenzitě  $\frac{1}{2} A$  na frekvencích  $\pm F$ .

Spektrum druhé složky  $s_2(t) = x(t) \cos \Omega t$  získáme na základě poučky o frekvenčním posunutí spektra

$$S_2(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \Omega t e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{2} X(f - F) + \frac{1}{2} X(f + F) \quad (3.5)$$



Obr. 3: Spektrum signálu AM

Charakter výsledného spektra signálu AM je uveden na obrázku.

Ze zobrazení a ze vztahu vyplývá, že

- Amplitudovou modulací se původní spektrum  $X(f)$  modulačního signálu přesune ze základní polohy do okolí nosné frekvence  $F$ ,
- Spektrum signálu AM je souměrné kolem nosné frekvence  $F$ ,
- Spektrum signálu AM obsahuje tři složky – harmonickou složku s frekvencí nosného signálu, dolní a horní postranní složku signálu (pásmo).
- Šířka spektra signálu AM, a tím i potřebného kanálu pro jeho přenos odpovídá dvojnásobku šířky spektra modulačního signálu

$$B_s = 2F_m \quad (3.6)$$

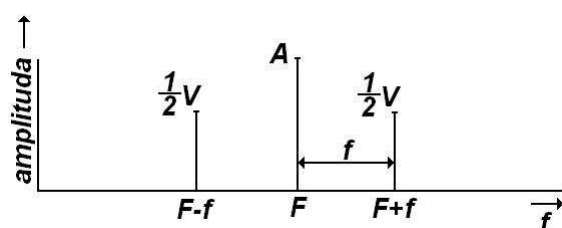
Některé další poznatky můžeme získat při uvážení modulace harmonickým průběhem vyjádřeným rovnicí  $x(t) = V \cos \omega t$  nebo  $x_n(t) = \cos \omega t$ . Dosazením do vztahu

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (3.2)$$

Dostaneme rovnici

$$s(t) = [A + x(t)] \cos \Omega t = (A + V \cos \omega t) \cos \Omega t = A \cos \Omega t + \\ + \frac{V}{2} [\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t] \quad (3.7)$$

Odpovídající zobrazení jednostranným spektrem je uvedena na obrázku.



Obr. 4: Spektrum signálu AM při modulaci harmonickým průběhem

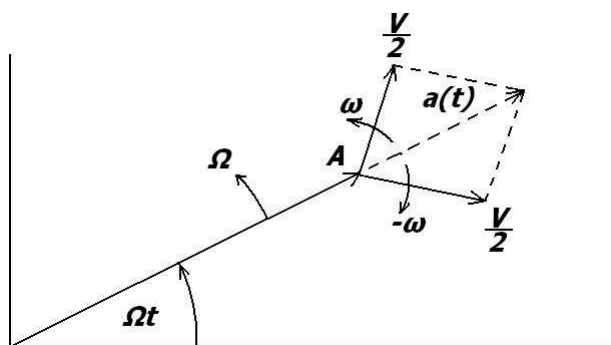
### 3.4. Fázorové znázornění

Na obrázku 5. je fázorové znázornění AM podle vztahu

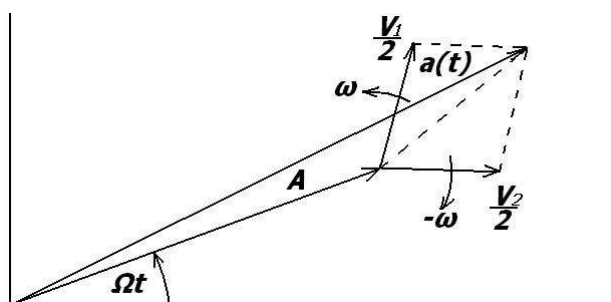
$$s(t) = A \cos \Omega t + \frac{V}{2} [\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t]. \quad (3.7)$$

Pro větší názornost jsou k fázorům připsána pouze označení jejich modulu.

Fázor nosného signálu rotuje úhlovou rychlostí  $\Omega$ , fázory postranních složek rotují relativně k této rychlosti rychlostmi  $\pm\omega$ . Pokud jsou obě postranní složky shodné co do amplitudy a fáze, je jejich výsledný fázor soufázový s fázorem nosného signálu, a ovlivňuje tak pouze velikost nosného signálu. Budou li např. amplitudy postranních složek rozdílné, nebude součet jejich fázorů soufázový s fázorem nosného signálu a vedle AM vznikne přídavná úhlová modulace. Fázor nosného signálu bude jednak vykazovat vzhledem k  $\Omega t$  fázové odchylky  $\Phi(t)$ , jednak vznikne zkreslení  $a(t)$  obálky. Proto musí být použité pásmové propusti pro signál AM symetrické kolem nosné frekvence.



Obr. 5: Fázorové znázornění AM



Obr. 6: Vliv nesymetrie postranních složek na zkreslení signálu AM

### 3.5. Výkon

Dalším významným poznatkem je rozdělení výkonu na dílčí složky signálu AM. Střední výkon signálu AM na zátěži  $R = 1\Omega$  určíme ze vztahu

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (3.2)$$

$$P_s = \overline{s^2(t)} = \overline{A^2 \cos^2 \Omega t} + \overline{x^2(t) \cos^2 \Omega t} + 2\overline{Ax(t) \cos^2 \Omega t} \quad (3.8)$$

Uvážíme-li, že

$$\overline{A^2 \cos^2 \Omega t} = \frac{1}{2} A^2 = P_n \quad (3.9)$$

je střední výkon nosného signálu

$$\overline{\cos^2 \Omega t} = \frac{1}{2} \quad (3.10)$$

$$\overline{x^2(t) \cos^2 \Omega t} = \overline{x^2(t)} \overline{\cos^2 \Omega t} = \frac{1}{2} \overline{x^2(t)} \quad (3.11)$$

kde  $\overline{x^2(t)}$  je střední výkon modulačního signálu  $x(t)$

$$2\overline{Ax(t) \cos^2 \Omega t} = 2\overline{Ax(t)} \overline{\cos^2 \Omega t} = A\overline{x(t)} \quad (3.12)$$

kde  $\overline{x(t)}$  je střední hodnota (stejnoseměrná složka) modulačního signálu; obvykle platí  $\overline{x(t)} = 0$ , lze tedy psát

$$P_s = \overline{s^2(t)} = \frac{1}{2}A^2 + \frac{1}{2}\overline{x^2(t)} = P_n + \frac{1}{2}\overline{x^2(t)} \quad (3.13)$$

nebo podle rovnice

$$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + mx_n(t)] \cos \Omega t \quad (3.2)$$

$$P_s = \frac{1}{2}A^2[1 + m^2\overline{x_n^2(t)}] \quad (3.14)$$

Je zřejmé, že druhý člen  $\frac{1}{2}\overline{x^2(t)}$  vyjadřuje střední výkon  $2P_p$  obou postranních složek a že jejich výkon je roven polovině výkonu modulačního signálu.

$$2P_p = \frac{1}{2}\overline{x^2(t)} = \frac{1}{2}m^2A^2\overline{x_n^2(t)} \quad (3.15)$$

kde  $P_p$  je střední výkon jedné postranní složky.

Zbývá ještě stanovit rozdělení celkového výkonu  $P_s$  mezi nosný signál a postranní složky. V praxi se signál obvykle charakterizuje špičkovým (vrcholovým) činitelem  $\alpha$ , který je dán poměrem jeho vrcholové hodnoty  $V$  k jeho efektivní hodnotě  $x_{ef}$

$$\alpha = \frac{V}{x_{ef}} = \frac{1}{x_{nef}} = \frac{1}{\sqrt{\overline{x_n^2(t)}}} \quad (3.16)$$

Výkon podle rovnice  $P_s = \frac{1}{2}A^2[1 + m^2\overline{x_n^2(t)}]$  můžeme psát ve tvaru

$$P_s = P_n[1 + m^2\overline{x_n^2(t)}] = P_n\left(1 + \frac{m^2}{\alpha^2}\right) \quad (3.17)$$

Podle této rovnice závisí rozdělení výkonu  $P$  mezi nosný signál a postranní složky na hloubce modulace  $m$  a na druhu modulačního signálu, resp. na jeho špičkovém činiteli  $\alpha$ .

V případě harmonického modulačního signálu bude  $\alpha = \sqrt{2}$ , takže

$$P_s = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)P_n \quad (3.18)$$

V krajním případě pro  $m = 1$  dostaneme vztah

$$P_s = \frac{3}{2}P_n = P_n + \frac{1}{2}P_n \quad (3.19)$$

Dvě třetiny celkového výkonu tedy připadají na výkon nosného signálu  $P_n$ , který ale nenese žádnou informaci. Při menší hloubce modulace jsou tyto poměry ještě horší.

Mnohem horší jsou poměry u sdělovacích signálů. Např. špičkový činitel telefonního signálu je  $\alpha \doteq 8$ . Ze vztahu  $P_s = P_n\left(1 + \frac{m^2}{\alpha^2}\right)$  dostaneme

$$P_s = P_n\left(1 + \frac{m^2}{64}\right) \quad (3.20)$$

a pro  $m = 1$  bude platit

$$P_s = \frac{65}{64}P_n = P_n + \frac{1}{64}P_n \quad (3.21)$$

V tomto případě připadá na výkon obou postranních složek pouze  $\frac{P_n}{64}$ . Z uvedeného je zřejmá malá výkonová účinnost AM.

Konečně kanál pro přenos signálu AM (např. zesilovač) musí být navržen pro přenos vrcholového výkonu a nikoliv středního. Vrcholový výkon signálu AM pro  $x_n(t) = 1$  bude

$$P_{s\max} = A^2(1 + m)^2 \quad (3.22)$$

Nejvyšší hodnoty  $P_{s\max} = 4A^2$  dosahuje pro  $m = 1$ . Nepříznivost výkonových poměrů AM ukazuje následující příklad.

*Příklad 1.2:*

*Amplituda nosného signálu je  $A = 5V$ , požadovaná hloubka modulace je  $m = 80\%$ . Špičkový činitel modulačního signálu je  $\alpha = 8$ . Máme určit přípustnou vrcholovou hodnotu modulačního signálu  $V$ , jeho střední výkon  $\overline{x^2(t)}$ , střední výkon signálu AM  $P_s$ , střední výkon jednoho postranního pásma  $P_p$  a potřebný výkon zesilovače  $P_{\max}$ .*

$$V = m \cdot A = 0,8 \cdot 5 = 4V$$

$$\overline{x^2(t)} = \frac{V^2}{\alpha^2} = \frac{4^2}{8^2} = \frac{1}{4}W$$

$$P_p = \frac{1}{4}m^2A^2\overline{x_n^2(t)} = \frac{1}{4} \cdot 0,8^2 \cdot 5^2 \cdot \frac{1}{16} = \frac{1}{16}W$$

$$P_s = P_n + 2P_p = \frac{1}{2}A^2 + 2P_p = 12,5 + \frac{2}{16} = 12,625W$$

$$P_{s\max} = A^2(1 + m)^2 = 5^2(1 + 0,8)^2 = 81W$$

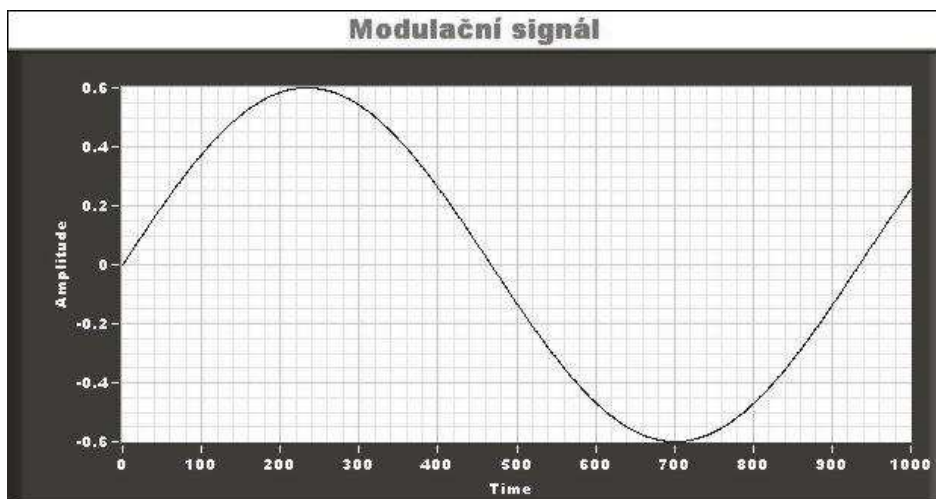
## 4. Amplitudová modulace s redukovanou nosnou vlnou

Amplitudová modulace s potlačenou nosnou frekvencí.

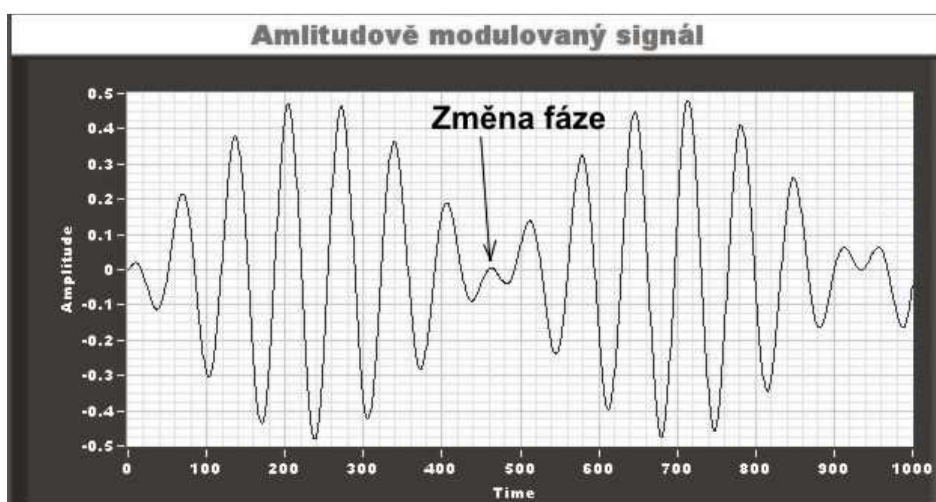
### 4.1. Základní vlastnosti DSB RC

Nazývaná také dvoupásmová modulace je ve frekvenční oblasti charakterizována přítomností pouze dolní a horní postranní složky, nosná vlna je potlačena. To odpovídá druhému členu v rovnici  $s(t) = A \cos \Omega t + x(t) \cos \Omega t = s_1(t) + s_2(t)$ . V časové oblasti bude tedy dvoupásmová modulace vyjádřena jednoduše součinem modulačního a nosného signálu.

$$s(t) = x(t) \cos \Omega t \quad (4.1)$$



Obr. 7: Časový průběh signálu dvoupásmové modulace s potlačenou nosnou frekvencí – Modulační signál



Obr. 8: Časový průběh signálu dvoupásmové modulace s potlačenou nosnou frekvencí – Amplitudově modulovaný signál

Odpovídající zobrazení je na obrázku 7. a 8. Obálku amplitud nosného signálu je sice opět modulační signál, ale není posunut vertikálně o amplitudu  $A$ , jako u signálu s nepotlačenou nosnou vlnou AM.

Podle  $S_2(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \Omega t e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{2}X(f - F) + \frac{1}{2}X(f + F)$  bude odpovídající vyjádření ve frekvenční oblasti ve tvaru

$$S(f) = \frac{1}{2}X(f - F) + \frac{1}{2}X(f + F) \quad (4.2)$$

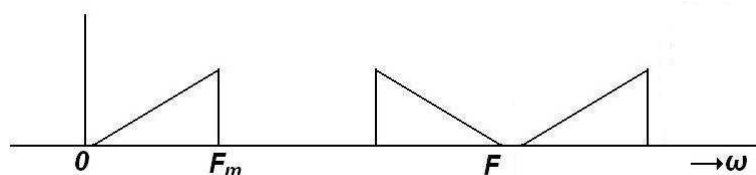
Rozložení spektra je stejné, jako u signálu s nepotlačenou nosnou vlnou, jen je vynechána složka s nosnou frekvencí.

Pro střední výkon modulovaného signálu DSB ze vztahu  $s(t) = x(t) \cos \Omega t$  ihned dostaneme rovnici



$$\overline{s^2(t)} = \overline{x^2(t) \cos^2 \Omega t} = \frac{1}{2} \overline{x^2(t)} \quad (4.3)$$

Potlačení nosné frekvence lze dosáhnout použitím tzv. vyváženého modulátoru.



Obr. 9: Spektrum signálu dvoupásmové modulace s potlačenou nosnou frekvencí

## 5. Jednopásmová amplitudová modulace

Jednopásmová modulace je frekvenční oblasti charakterizována přítomností pouze jedné postranní složky – horní nebo dolní. Druhá postranní složka a nosná jsou potlačeny (v angličtině single side band – SSB).

### 5.1. Základní vlastnosti SSB

Telekomunikační systémy používající amplitudovou modulaci mají základní nevýhodu v tom, že pro přenos modulovaného signálu vyžadují kanál, jehož frekvenční šířka je dvojnásobkem šířky spektra modulačního signálu. Tím se zhoršuje využitelnost přenosových cest. Také přítomnost nosné frekvence je nevýhodná, neboť samotný nosný signál váže značnou část vysílaného výkonu proti postranním složkám a jeho přenos zbytečně zatěžuje přenosová zařízení.

Uvážíme-li, že úplná informace modulačního signálu je obsažena v jediném postranním pásmu, stačilo by přenášet pouze jedno z postranních pásem bez nosného signálu, a tím by se i odstranily výše uvedené nevýhody. Při potlačení nosné frekvence se ale komplikuje demodulace. Proto některé přenosové systémy pracují s AM, nepotlačují signál nosný signál úplně, ale pouze částečně.

Dnešní mnohokanálové přenosové systémy s frekvenčním dělením kanálů používají výhradně jednopásmový přenos. Dvoupásmový přenos se používá u levných jednoduchých systémů a u malokanálových systémů. Systém s nesymetricky potlačeným pásmem se používá při přenosu signálů s nulovou nebo velmi nízkou dolní frekvencí modulačního signálu, kdy by potlačení jednoho pásma bylo velmi náročné. V praxi se používá pro přenos televizního signálu nebo datových signálů.

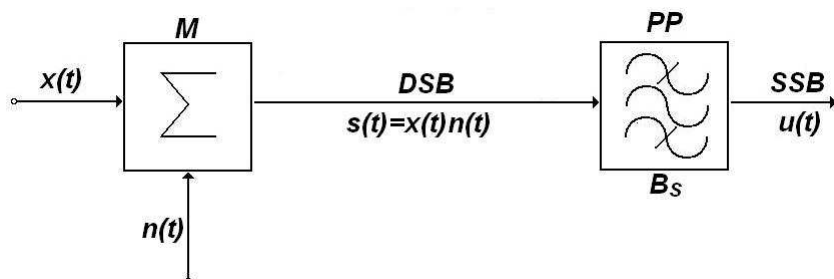
Potlačení nežádoucího postranního pásma lze dosáhnout dvěma způsoby:

- Zapojením vhodného filtru na výstup modulátoru

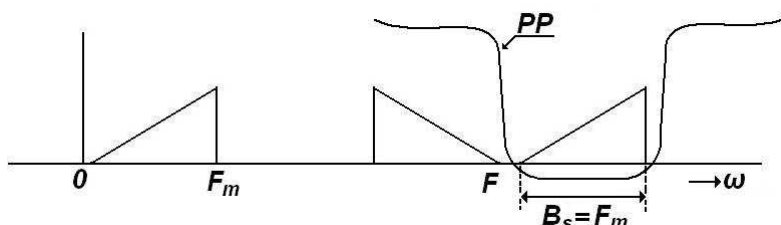
- Kompenzací nežádoucího produktu vhodným zapojením modulátoru (jednopásmová modulace)

## 5.2. Potlačení jednoho pásma pomocí filtru

První způsob (potlačení jednoho postranního pásma) je naznačen na obrázku 10. a 11.



Obr. 10: Blokové schéma potlačení postranního pásma filtrací



Obr. 11: Spektrum potlačení postranního pásma filtrací

Na výstup vyváženého modulátoru M je připojena pásmová propust PP, která propustí pouze jedno požadované pásmo. Na kvalitu pásmové propusti PP jsou kladeny dosti značné požadavky (strmost zlomových frekvencí, časová stálost), které rostou s volbou vyšší hodnoty nosné frekvence F.

Potřebná šířka kanálu pro přenos signálu SSB je  $B = F_m$ . Střední výkon signálu SSB odpovídá výkonu jedné postranní složky signálu DSB. Podle rovnice  $\overline{s^2(t)} = \overline{x^2(t) \cos^2 \Omega t} = \frac{1}{2} \overline{x^2(t)}$  nyní bude

$$\overline{s^2(t)} = \frac{1}{4} A^2 \overline{x^2(t)} \quad (5.1)$$

## 5.3. Jednopásmová modulace s fázovou kompenzací

Nevyžaduje použití náročné propusti, ale vyžaduje použít dva vyvážené modulátory. Princip této metody můžeme odvodit následujícím způsobem.

Uvažme harmonický modulační signál vyjádřený rovnicí  $x(t) = V \cos \omega t$  nebo

$x_n(t) = \cos \omega t$ . Po dosazení do vztahu  $s(t) = x(t) \cos \Omega t$  dostaneme.

$$s(t) = x(t)A \cos \Omega t = VA \cos \omega t \cos \Omega t = \frac{1}{2}VA[\cos(\Omega - \omega)t + \cos(\Omega + \omega)t] \quad (5.2)$$

Z toho např. horní postranní složka bude

$$u_1(t) = \frac{1}{2}VA \cos(\omega - \Omega)t \quad (5.3)$$

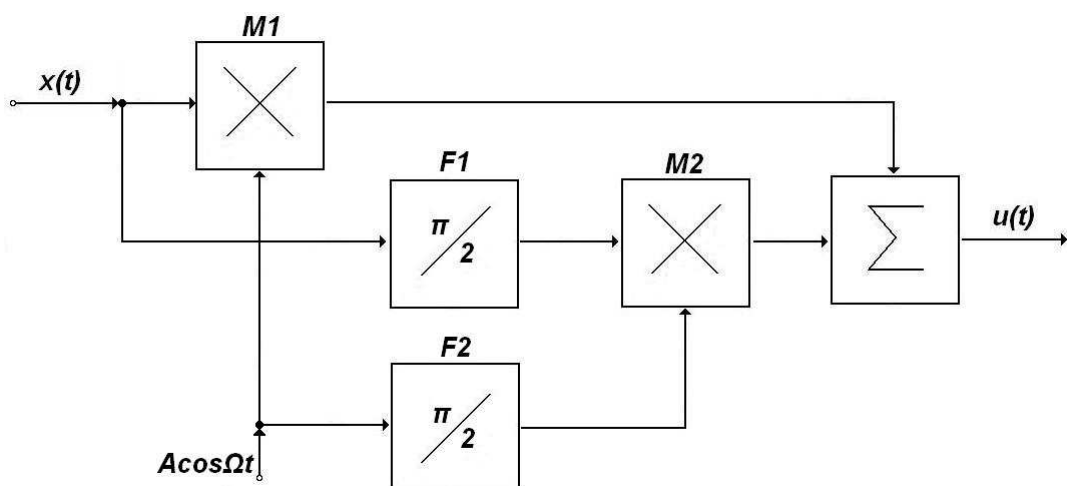
Podle goniometrické poučky rozložíme tento výraz na dva členy

$$u_1(t) = \frac{1}{2}VA \cos(\omega - \Omega)t = u_1(t) = \frac{1}{2}VA[\cos \omega t \cos \Omega t - \sin \omega t \sin \Omega t] \quad (5.4)$$

Nahradíme-li ještě funkci sinus funkcí cosinus, dostaneme

$$u_1(t) = \frac{1}{2}VA \cos \omega t \cos \Omega t - \frac{1}{2}VA \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\Omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.5)$$

Z toho vyjádření vyplývá princip získání horní postranní složky. První člen  $\frac{1}{2}VA \cos \omega t \cos \Omega t$  (soufázová složka) odpovídá výstupu vyváženého modulátoru M1, na jehož vstupy je přiveden nosný signál  $A \cos \Omega t$  a modulační signál  $V \cos \omega t$ .



Obr. 12: Jednopásmový modulátor s fázovou kompenzací

Druhý člen  $\frac{1}{2}VA \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\Omega t - \frac{\pi}{2}\right)$  (kvadrurní složka) odpovídá výstupu vyváženého modulátoru M2, na jehož vstupu jsou přivedeny stejné průběhy, ale s posuvem (zpoždění)  $\frac{\pi}{2}$ . Rozdílem těchto dvou výstupních signálů dostaneme požadovanou horní postranní složku  $\frac{1}{2}VA \cos(\Omega - \omega)t$ . Odpovídající blokové schéma je na obrázku 12. Kdybychom chtěli získat dolní postranní složku, tj

$$u_2(t) = \frac{1}{2}VA \cos(\Omega - \omega)t \quad (5.6)$$

Dostaneme analogicky k předchozímu vztahu

$$u_2(t) = \frac{1}{2}VA \cos(\Omega - \omega)t = \frac{1}{2}VA(\cos \omega t \cos \Omega t + \sin \omega t \sin \Omega t) =$$

$$= \frac{1}{2}VA \cos \omega t \cos \Omega t + \frac{1}{2}VA \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left( \Omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.7)$$

Získaný výsledek se liší od výrazu pro  $u_1(t)$  pouze ve znaménku u druhého členu. Odpovídající schéma pro vytvoření dolní postranní složky bude tedy shodné se schématem na obrázku 12, ale výstupy modulátorů M1 a M2 se v tomto případě sečtou.

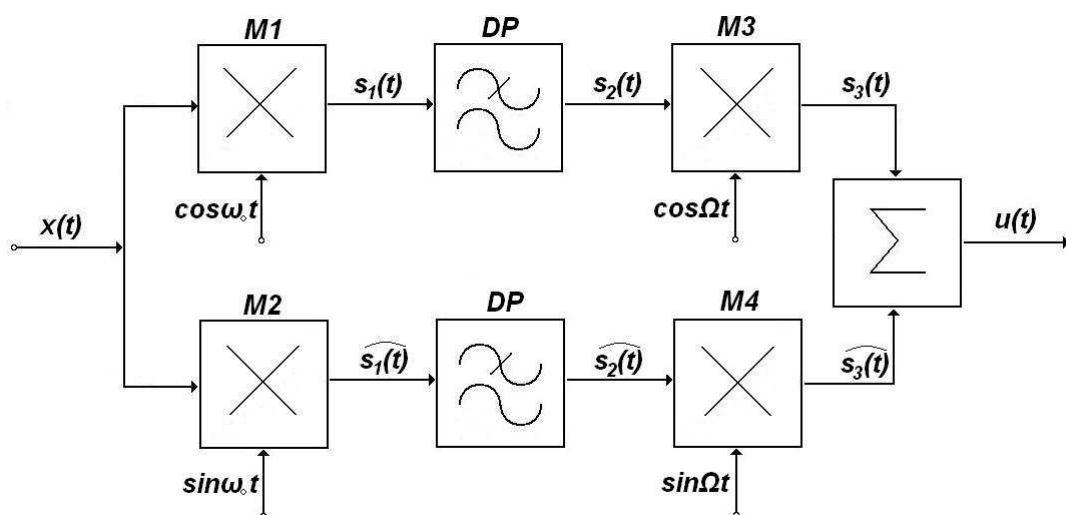
Protože každý průběh  $x(t)$  může být vyjádřen součtem elementárních harmonických průběhů, platí předchozí poznatky pro libovolný průběh modulačního signálu  $x(t)$ .

V praxi nedosáhneme plného potlačení nežádoucí postranní složky. Výsledný posuv fázovacího článku  $F_1$  bude v pásmu spektra modulačního signálu ležet v určitých tolerancích hodnoty  $\frac{\pi}{2}$ , takže postranní složka bude vždy utlumená jen s konečnou hodnotou, a to tím vyšší, čím kvalitnější bude fázovací členek  $F_1$ . V praxi se dosahuje potlačení postranní složky asi o 30 dB.

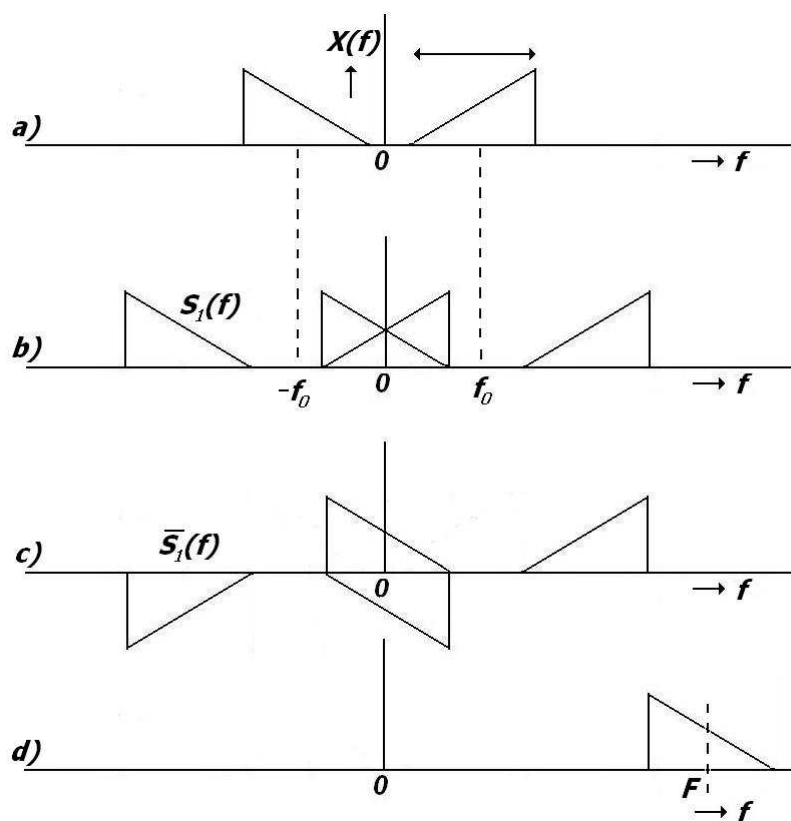
Na útlum potlačené postranní složky bude mít vliv i nevyváženost reálných modulátorů M1 a M2.

## 5.4. Weaverova metoda jednopásmová modulace

Existuje ještě jedna metoda jednopásmové modulace navržená D. K. Weaverem (Weaverova metoda jednopásmová modulace). Příslušné blokové schéma je uvedeno na obrázku 13.



Obr. 13: Weaverova metoda jednopásmové modulace



Obr. 14: Charakter spekter ve Weaverově modulátoru

Vstupní modulační signál  $x(t)$ , jehož spektrum  $X(f)$  musí být předem omezeno na konečný interval šířky  $B_s$ , působí nejprve na první pár vyvážených modulátorů M1 a M2 (dvoupásmová modulace), které jsou napájeny nosnými signály posunutými o úhel  $\frac{\pi}{2}$ , tedy  $\cos \omega_0 t$  a  $\sin \omega_0 t$ . Frekvence těchto nosných signálů  $f_0$  je zvolena tak, aby odpovídala hodnotě střední frekvence spektra  $X(f)$ . Výstupní spektra  $S_1(f)$  a  $S_2(f)$  budou rozložena podle obrázku 14b. Následující dolní propusti DP vybírají v obou větvích pouze složky rozložené v okolí počátku frekvenční osy. Tyto vybrané složky vstupují do dalšího páru vyváženého modulátoru M3 a M4, které jsou napájeny nosnými signály posunutými o úhel  $\frac{\pi}{2}$ , tj.  $\cos \Omega t$  a  $\sin \Omega t$ . Frekvence  $F$  těchto nosných signálů je zvolena tak, aby po této druhé modulaci byly výstupní složky již přesunuty do požadované vyšší frekvenční polohy. Po sloučení složek z obou větví se nežádoucí složky vykompenzují a výsledkem je jedno postranní pásmo, které je rozloženo v okolí nosné frekvence  $F$ , jak je znázorněno na obrázku 14d.

Postupné přetváření vstupního modulačního signálu  $x(t)$  můžeme jednoduše sledovat pro případ harmonického modulačního průběhu  $x(t) = V \cos \omega t$ .

V jednotlivých místech obou větví zapojení na obrázku 14. budou zřejmě následující průběhu

$$s_1(t) = V \cos \omega t \cos \omega_0 t = \frac{1}{2} V [\cos(\omega_0 - \omega) t + \cos(\omega_0 + \omega) t] \quad (5.8)$$

$$\tilde{s}_1(t) = V \cos \omega t \sin \omega_0 t = \frac{1}{2} V [\sin(\omega_0 + \omega) t + \sin(\omega_0 - \omega) t] \quad (5.9)$$

Na výstupu následující dolní propusti DP se objeví jen složky s frekvencí  $(\omega_0 - \omega)$ , takže bude platit

$$s_2(t) = \frac{1}{2} V \cos(\omega_0 - \omega) t \quad (5.10)$$

$$\tilde{s}_2(t) = \frac{1}{2} V \sin(\omega_0 - \omega) t \quad (5.11)$$

Tyto složky modulují nosný signál s frekvencí  $F$ . Dostaneme

$$s_3(t) = s_2(t) \cos \Omega t = \frac{1}{2} V \cos(\omega_0 - \omega) t \cos \Omega t =$$

$$s_3(t) = \frac{1}{4} V \{ \cos[\Omega + (\omega_0 - \omega)] t + \cos[\Omega - (\omega_0 - \omega)] t \} \quad (5.12)$$

$$\tilde{s}_3(t) = \tilde{s}_2(t) \sin \Omega t = \frac{1}{2} V \sin(\omega_0 - \omega) t \sin \Omega t =$$

$$\tilde{s}_3(t) = \frac{1}{4} V \{ \cos[\Omega - (\omega_0 - \omega)] t - \cos[\Omega + (\omega_0 - \omega)] t \} \quad (5.13)$$

Výstup  $u(t)$  je tvořen součtem signálů z obou větví. Přitom se kompenzují složky s frekvencí  $[F + (f_0 - f)]$ , takže bude platit

$$u(t) = s_3(t) + \tilde{s}_3(t) = \frac{1}{2} V \{ \cos[\Omega - (\omega_0 - \omega)] t \} \quad (5.14)$$

Výsledný průběh charakterizuje dolní postranní složku (spektrum v invertované poloze). Při odečtení dostaneme horní postranní složku (spektrum v přímé poloze) ve tvaru

$$u(t) = s_3(t) - \tilde{s}_3(t) = \frac{1}{2} V \{ \cos[\Omega + (\omega_0 - \omega)] t \} \quad (5.15)$$

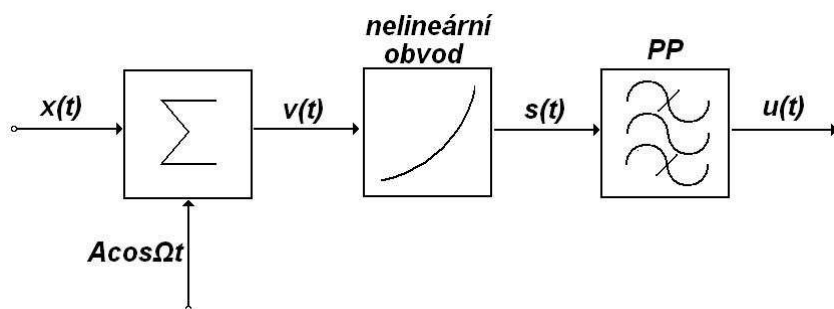
Tato metoda jednopásmový modulace neklade náročné požadavky na strmost filtrů a nepoužívá širokopásmové fázovací články. Potlačené postranní pásmo leží ve stejné poloze jako užitečné pásmo, tím je potlačeno rušení od sousedních kanálů u nosných systémů. Nevýhodou je, že dokonalost potlačení postranního pásma (kompenzace) závisí na symetrii obou paralelních větví. V analogové verzi je splnění této podmínky dosti náročné, avšak v číslicové verzi nečiní potíže.

## 6. Realizace

Podle teoretického vztahu

$s(t) = a(t) \cos \Omega t = [A + x(t)] \cos \Omega t = A[1 + m x_n(t)] \cos \Omega t$  je signál AM vyjádřen součinem časových průběhů. Je tedy možné realizovat AM zařízením (modulátorem), jehož výstup je úměrný součinu dvou vstupních průběhů. Takový součin lze v praxi realizovat nelineárním

obvodem, který má uspořádání podle obr. 15. Na vstupu lineárního obvodu působí součet nosného a modulačního signálu. Propust PP slouží pro potlačení nežádoucích (neužitečných) modulačních produktů.



Obr. 15: Princip realizace amplitudové modulace (blokové schéma)

V praxi můžeme využít dvou druhů nelinearity:

1. obvod s nelineární spojitou charakteristikou,
2. obvod s lineární lomenou charakteristikou.

Podle toho pak také rozlišujeme pracovní režim modulátoru.

#### *Modulátor v režimu nelineární charakteristiky*

Přenosovou charakteristiku nelineárního obvodu na obr. 15 vyjádříme ve tvaru mocninové řady

$$s(t) = a_1 v(t) + a_2 v^2(t) + a_3 v^3(t) + \dots \quad (6.1)$$

Vstupní signál  $v(t)$  je dán součtem nosného a modulačního signálu

$$v(t) = x(t) + A \cos \Omega t \quad (6.2)$$

Po dosazení do řady a provedení Fourierovy transformace získáme hledané spektrum signálu  $s(t)$ .

Jednodušeji však získáme přehled o charakteru spektra, zvolíme-li  $x(t) = V \cos \omega t$ . Bude-li charakteristika použitého nelineárního prvku v okolí zvoleného pracovního bodu vyjádřena např. prvními dvěma členy mocninové řady, dostaneme po dosazení a úpravě

$$\begin{aligned} s(t) &= a_1 v(t) + a_2 v^2(t) = \\ s(t) &= \frac{1}{2} a_2 (A^2 + V^2) + a_1 V \cos \omega t + a_1 A \cos \Omega t + \frac{1}{2} a_2 V^2 \cos 2\omega t + \\ &+ \frac{1}{2} a_2 A^2 \cos 2\Omega t + \underline{a_2 AV \cos(\Omega + \omega) t} + \underline{a_2 AV \cos(\Omega - \omega) t} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Podtržené členy charakterizují užitečné modulační produkty, ostatní jsou neužitečné (rušivé) produkty, které lze potlačit propustí PP. Spektrum výstupního průběhu vyjádřeného rovnicí je na obrázku 16 znázorněné plnou čarou.

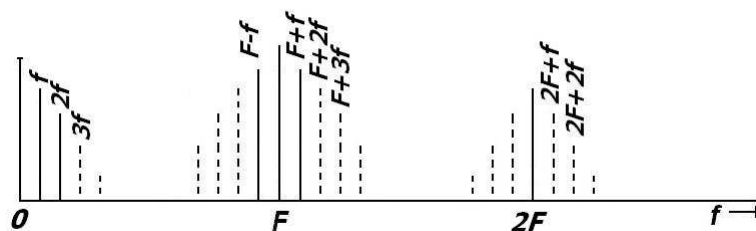
Bude-li charakteristika požitého nelineárního prvku zahrnovat další členy mocninové řady, objeví se ve výsledném spektru řada dalších neužitečných (rušivých) produktů. Rozložení několika takových dalších neužitečných produktů je naznačeno na obr. 16 čárkovaně.

V případě obecného průběhu modulačního signálu  $x(t)$  se každá spektrální čára nahradí spektrem tohoto signálu (viz např. obrázku 3). Pak ovšem mohou pásmo dolní a horní postranní složky překrývat některé rušivé složky.

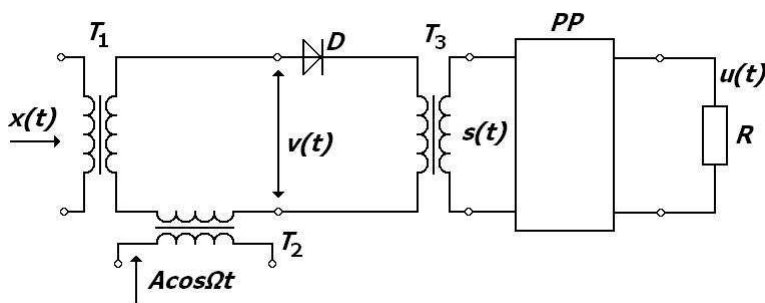
Obvod s nelineární charakteristikou lze jednoduše realizovat např. použitím elektronky, tranzistoru nebo diody.

## 6.1. Jednocestný diodový modulátor

V telekomunikační technice se velmi často používají modulátory s diodami. Nejjednodušší praktická realizace modulátoru – jednocestný modulátor (na základě obrázku 15) – je naznačena na obrázku 17.



Obr. 16: Spektrum na výstupu modulátoru v režimu nelineární charakteristiky

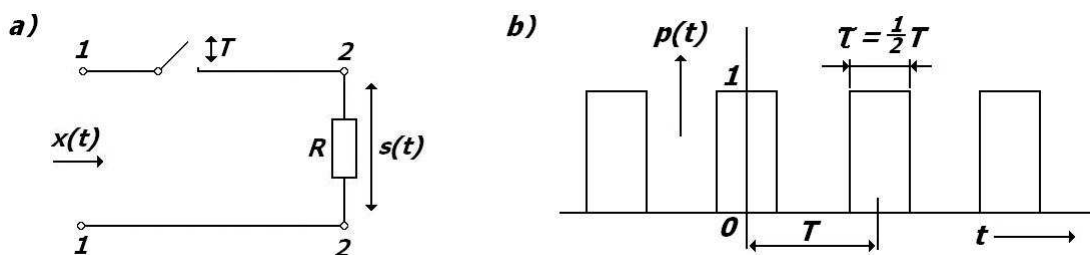


Obr. 17: Realizace jednocestného amplitudového modulátoru s diodou

### Modulátor v režimu lineární lomené charakteristiky

Nelineární obvod na obrázku 15 je v tomto případě tvořen obvodem s lineární lomenou charakteristikou. Takový obvod lze jednoduše realizovat periodickým přepínáním lineárního obvodu z jednoho lineárního stavu do jiného lineárního stavu – obvod s časově proměnnými parametry.





Obr. 18: Spínací modulátor

Takovým nejjednodušším obvodem je spínač, který periodicky s periodou  $T$  nosného signálu připojuje vstupní modulační signál  $x(t)$  k výstupním svorkám 2-2 (viz obrázek 18), (skokem se mění zatěžovací odpor zdroje  $x(t)$ ). Proto se často nazývá *spínací modulátor*. Takové spínání můžeme matematicky vyjádřit přepínací funkcí  $p(t)$ , která má po dobu sepnutí jednotkovou velikost a po dobu rozepnutí je rovna nule (periodická řada pravoúhlých impulsů – obrázek 18b). Takový časový průběh vyjádříme rozvojem ve Fourierovu řadu

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\Omega t} = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin n\frac{\pi}{2}}{n\frac{\pi}{2}} \right| \cos n\Omega t =$$

$$p(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \Omega t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\Omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\Omega t + \dots \quad (6.4)$$

Z obr. 18 je zřejmé, že výstupní průběh  $s(t)$  na zátěži  $R$  bude dán součinem

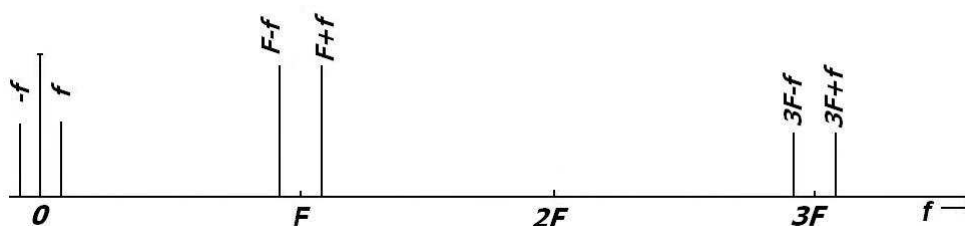
$$s(t) = x(t) p(t) \quad (6.5)$$

Po dosazení za  $p(t)$  a pro případ harmonického modulačního signálu  $x(t) = A \cos \omega t$  dostaneme

$$s(t) = \frac{1}{2} A \cos \omega t + \frac{A}{\pi} \cos(\Omega + \omega)t + \frac{A}{\pi} \cos(\Omega - \omega)t +$$

$$+ \frac{A}{3\pi} \cos(3\Omega + \omega)t + \frac{A}{3\pi} \cos(3\Omega - \omega)t + \dots \quad (6.6)$$

Druhý a třetí člen charakterizují užitečné modulační produkty, ostatní jsou neužitečné (rušivé) produkty, které mohou být potlačeny pásmovou propustí. Charakter rozložení spektrálních složek je naznačen na obr. 19. Stejně rozložení užitečných a neužitečných modulačních produktů bude vykazovat výstupní signál  $s(t)$  i při libovolném průběhu modulačního signálu  $x(t)$ .



Obr. 19: Spektrum na výstupu spínacího modulátoru

Na rozdíl od modulátoru pracujícího v režimu nelineární charakteristiky je v tomto případě potlačena nosná frekvence a sudé násobky nosné frekvence včetně postranních složek (jen v případě, kdy doba sepnutí  $\tau = \frac{1}{2} T$ ).

Vrátíme-li se ke vztahu  $s(t) = x(t) p(t)$  a následujícímu rozboru, je zřejmé, že amplitudovou modulaci (posunutí spektra) můžeme realizovat nejen použitím nosného signálu ve tvaru harmonického průběhu s opakovací frekvencí  $F$ , neboť každý periodický průběh lze rozložit do tvaru Fourierovy řady, která obsahuje harmonické složky  $0, F, 2F, 3F, \dots$ . Na vzniku užitečných modulačních produktů se všem podílí pouze složka s frekvencí  $F$ , ostatní složky dají vznik neužitečným produktům.

Při praktické realizaci se spínací prvek nejčastěji realizuje pomocí diody nebo tranzistoru. Aby např. funkce diody byla blízká funkci spínače, je třeba použít nosný signál  $n(t)$  o velké amplitudě, několikrát větší než vrcholová hodnota modulačního signálu.

Při dostatečně velké amplitudě nosného signálu bude dioda téměř celou kladnou půlvlnu vykazovat malý odpor v přímém směru (spínač sepnut) a při záporné půlvlně velký odpor ve zpětném směru (spínač rozepnut). Voltampérovou charakteristikou uvedou na obr. 20. zapojení takového jednocestného modulátoru s diodou ve spínacím režimu bude shodné se zapojením uvedeným na obr. 17. napětí  $v(t)$  na diodě je tedy opět dáno součtem podle rovnice.

$$y(t) = \int_0^t x(t) g(t - \tau) d\tau = x(t) \cdot g(t) \quad (6.7)$$

Výstupní signál  $s(t)$  bude úměrný proudu procházejícímu diodou

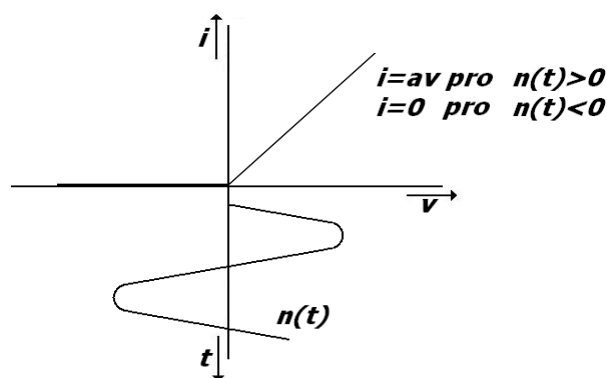
$$s(t) \approx i(t) = av(t) \cdot p(t) = a[x(t) + A \cos \Omega t]p(t) \quad (6.8)$$

Kde  $p(t)$  je dříve definovaná spínací funkce, jejíž zavedení zde umožňuje matematicky vyjádřit dva stavy (obr. 20).

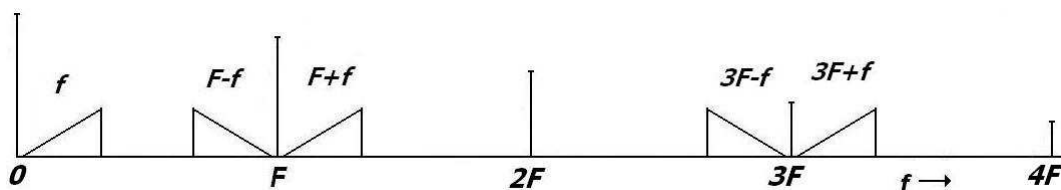
Vztah  $s(t) \approx i(t) = av(t) \cdot p(t) = a[x(t) + A \cos \Omega t]p(t)$ , který vyjadřuje výstupní signál  $s(t)$ , obsahuje proti předcházejícímu vztahu  $s(t) = x(t) p(t)$  navíc člen  $a A \cos \Omega t p(t)$ .

Uvážíme-li rozvoj  $p(t)$  podle  $p(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \Omega t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\Omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\Omega t + \dots$ , budou tomuto členu odpovídat spektrální čáry na frekvencích  $F, 2F, 4F, 6F, \dots$

Spektrum signálu vyjádřeného vztahem  $s(t) \approx i(t) = av(t) \cdot p(t) = a[x(t) + A \cos \Omega t]p(t)$  je naznačeno na obr. 21.



Obr. 20: Lineární lomená charakteristika

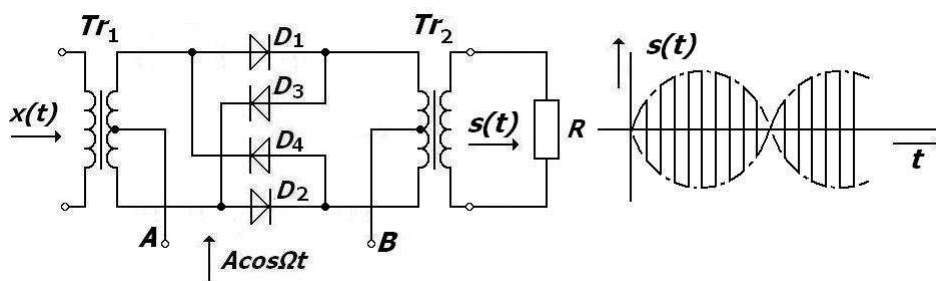


Obr. 21: Spektrum spínacího modulátoru s diodou

Z uvedených rozborů vyplývá:

1. U diodového modulátoru může jedno a totéž zapojení pracovat buď v režimu nelineární charakteristiky, nebo v režimu lineární lomené charakteristiky (spínací modulátor). Realizace těchto režimů se liší jen volbou amplitudy nosného signálu.
2. Při praktické realizaci AM bude modulovaný signál  $s(t)$  obsahovat vedle užitečných modulačních produktů typu  $F$  a  $F \pm f$  ještě řadu neužitečných (rušivých) produktů. Různé typy modulátorů AM se pak liší obsahem těchto rušivých produktů a výslednou účinností (poměrem výkonu užitečných produktů k celkovému výkonu).

## 6.2. Kruhový diodový modulátor



Obr. 22: Kruhový modulátor

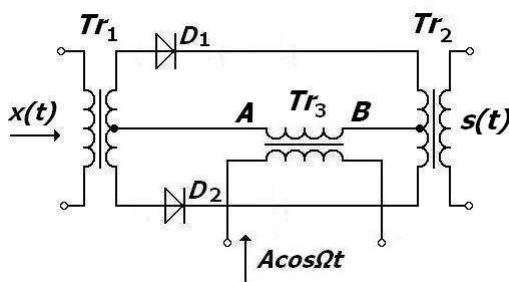
Jednocestný modulátor má nejmenší účinnost a nejvíce rušivých produktů. Proto se užívají složitější modulátory, jako je kruhový modulátor (obr. 22). I tyto složitější diodové modulátory

mohou pracovat ve dvou výše uvedených základních režimech, a to podle volby velikostí amplitudy nosné. V praxi se obvykle používá spínací režim. V tom případě jsou u kruhového modulátoru uvedeného na obr. 22 při kladné půlvlně nosného signálu na svorce a otevřeny diody D1 a D2 a při záporné půl diody D3 a D4. Ostatní jsou uzavřeny.

U složitějších modulátorů je vstup pro nosný signál uspořádán symetricky (obr. 22). Takový modulátor pak na výstupu potlačuje nosnou frekvenci a její násobky. Nazývá se vyvážený (symetrický) modulátor. Problém je dodržení souměrnosti obou větví, diody je nutné párovat. Vlivem zbytkové nesouměrnosti nebude nosná frekvence potlačena úplně. Ve všech uvedených případech se ze signálu  $s(t)$  získají užitečné produkty  $u(t)$  následujícím filtrem PP (pásmovou propustí) podle obr. 15.

### 6.3. Dvoucestný diodový modulátor

Dvoucestný diodový modulátor obr. 21. Patří mezi vyvážené modulátory (modulátory AM s potlačenou nosnou vlnou) mohou využívat diod nebo tranzistorů ve funkci přepínačů, ovládaných nosnou vlnou.

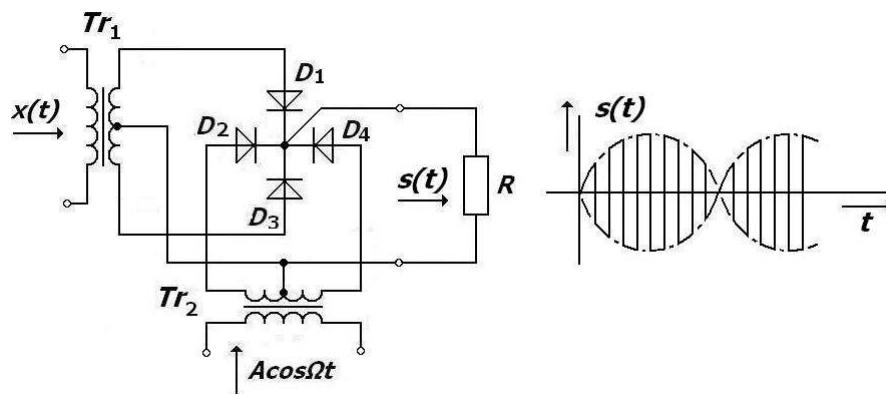


Obr. 21: Schéma zapojení dvoucestného diodového modulátoru.

Napětí nosné vlny přepíná modulační signál do dvou cest, které se uzavírají spínáním diod. Signálová cesta se uzavírá výstupním transformátorem. Jestliže přepínací napětí na sekundárním vinutí transformátoru  $Tr_1$  má polaritu, jež odpovídá kladnému napětí na anodě diody  $D_1$ , tato dioda se otevírá a uzavírá tak cestu modulačnímu signálu z bodu A sekundárního vinutí transformátoru  $Tr_3$  na horní část primárního vinutí výstupního transformátoru  $Tr_2$  a odtud na sekundární vinutí, které představuje výstup modulátoru. Změní-li se polarita vstupního (přepínacího) napětí, otevře se dioda  $D_2$  a umožní tak průchod modulačního signálu na výstup modulátoru v opačné fázi, než byla v předchozím případě.

### 6.4. Křížový diodový modulátor

Křížový diodový modulátor slouží k vytvoření modulačního signálu s potlačenou nosnou frekvencí. Výsledný signál je obdobný jako u modulátoru kruhového.



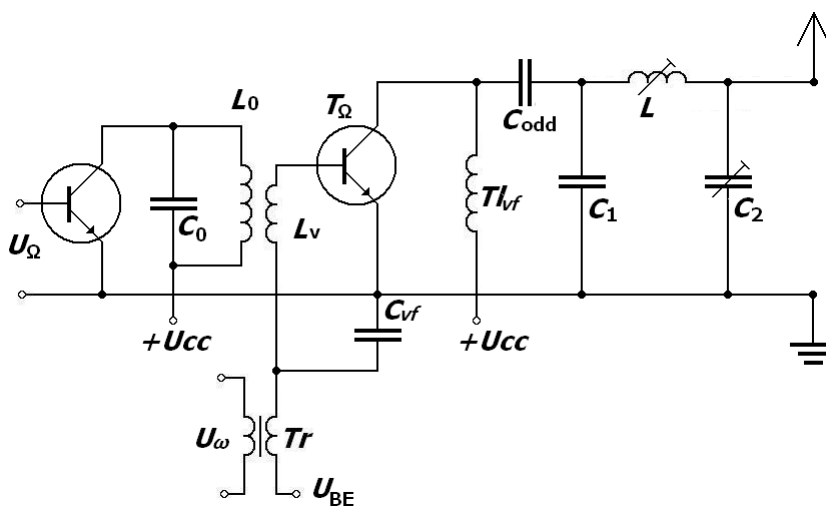
Obr. 22: Schéma zapojení křížového diodového modulátoru

## 6.5. Další modulátory

Pro aplikaci modulátorů se dají použít další druhy modulátorů. Například s tranzistorem nebo integrovaným obvodem atd.

### 6.5.1. Tranzistorové modulátory

#### Bázový modulátor



Obr. 23: Schéma zapojení bázového modulátoru

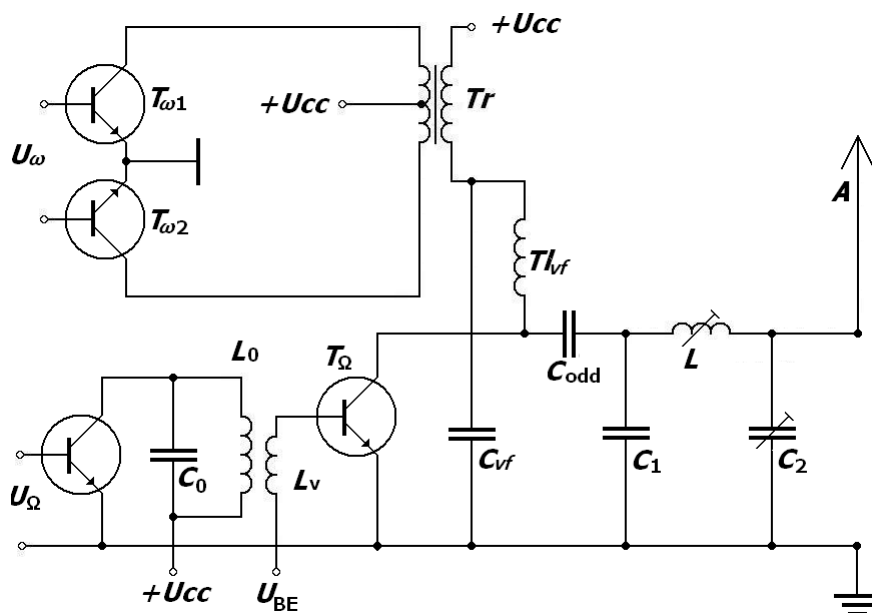
Bázový modulátor (modulátor s nízkou úrovní modulačního signálu) využívá opět koncového stupně vf zesilovače. Vstupní (relativně velké) vf napětí je v obvodu báze superponováno na modulační napětí malé amplitudy. Přitom je samozřejmě vhodně nastaven klidový pracovní bod stupně stejnosměrným napětím  $U_{BE}$ . Pro vysvětlení činnosti opět

předpokládejme nízkofrekvenční modulační napětí, které máme namodulovat na vysokofrekvenční nosnou vlnu rozhlasového vysílače.

Vysokofrekvenční napětí přichází z budiče pomocí vazebního vinutí paralelního rezonančního obvodu na koncový stupeň s tranzistorem  $T_{\Omega}$ . Spodní vývod vazebního vinutí je pro vysokofrekvenční napětí blokován kondenzátorem  $C_{vf}$ . Modulační napětí  $u_{\omega}$  je přiváděno na bázi přes transformátor  $Tr$  (pro nízkofrekvenční napětí představuje  $C_{vf}$  rozpojený obvod). V $f$  i  $nf$  napětí působí v obvodu báze, a to tak, že  $nf$  napětí způsobuje posuv časové osy napětí  $u_{BE}$  v rytmu  $nf$  napětí).

### Kolektorový (Heissingův) modulátor

Kolektorový (Heissingův) modulátor patří mezi modulátory, u nichž se modulace provádí na vysoké výkonové úrovni, nejčastěji v koncovém vysokofrekvenčním stupni vysílače AM. Proto musí mít i modulační signál vysokou výkonovou úroveň. Předpokládejme nízkofrekvenční modulační napětí, které máme namodulovat na vysokofrekvenční nosnou vlnu rozhlasového vysílače.

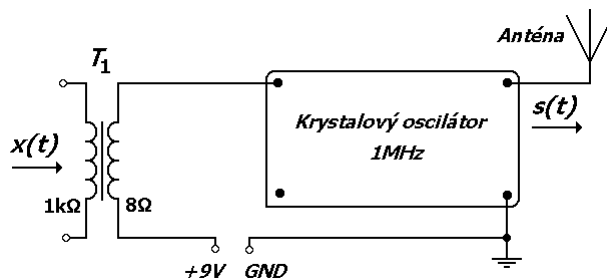


Obr. 24: Schéma zapojení kolektorového modulátoru

Modulační napětí  $u_{\omega}$  je přiváděno na výkonový stupeň s výstupním transformátorem, přes jehož sekundární vinutí je napájen koncový stupeň vysokofrekvenčního zesilovače. Tlumivka  $TL_{vf}$  brání pronikání  $vf$  signálu do obvodu modulačního transformátoru, kondenzátor  $C_{vf}$  zbytky  $vf$  napětí svádí k zemi. Pro modulační napětí nízké frekvence představuje tlumivka zkrat a kondenzátor rozpojený obvod.

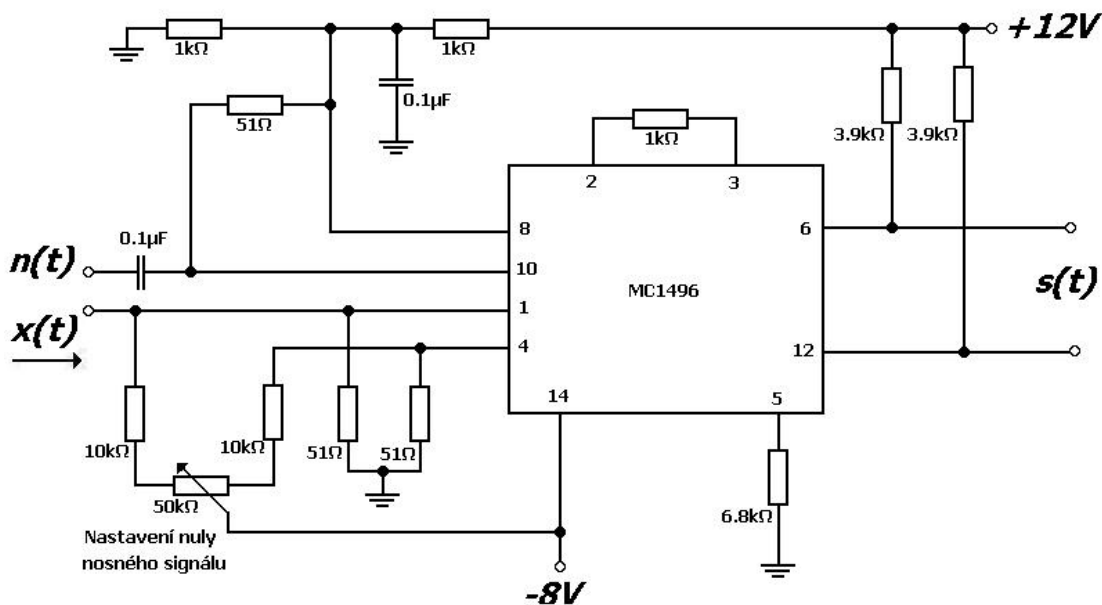
## 6.5.2. Krystalový modulátor

Tento amplitudový vysílač je jednoduchý a dá se sestavit během pár minut. V závislosti na anténě je dosah vysílání 2-50 m. Základním prvkem je krystalový oscilátor a audio transformátor. Oscilátor po přivedení napájení začne kmitat na výstupu daným kmitočtem krystalového oscilátoru. Další součástí je audio transformátor. V tomto okruhu je použit jako modulátor a mění složení rádiové vlny, které pak odpovídá vstupnímu signálu. Vytváří amplitudově modulovaný signál s potlačenou nosnou vlnou.

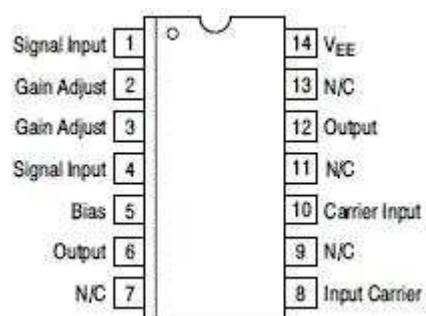


Obr. 25: Schéma zapojení krystalového modulátoru

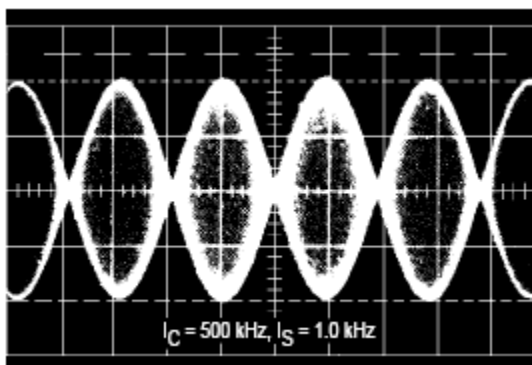
## 6.5.3. S integrovaným obvodem MC1496



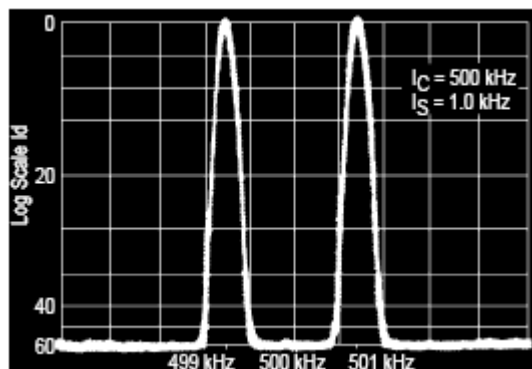
Obr. 26: Schéma zapojení amplitudového modulátoru s obvodem MC1496



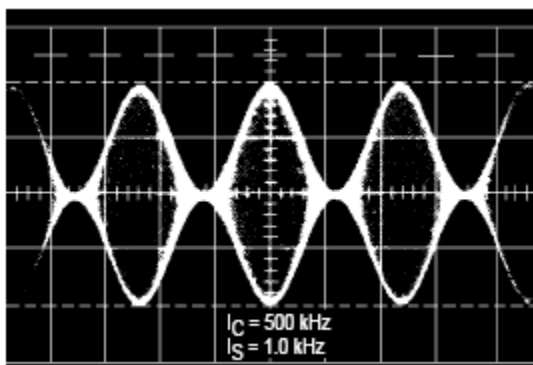
Obr. 27: Označení vývodů MC1496



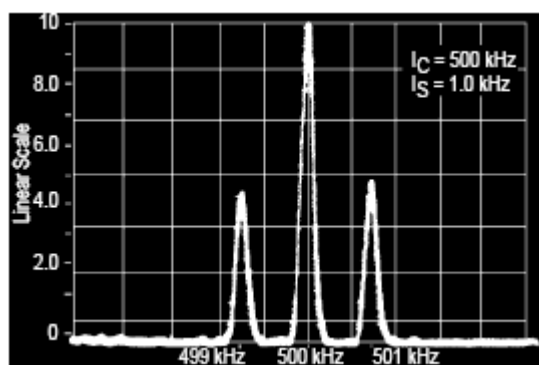
Obr. 28: DSB RC



Obr. 29: Spektrum DSB RC



Obr. 30: DSB



Obr. 31: Spektrum DSB

Jde o integrovaný obvod s použitím na AM a FM modulace a demodulace. Zapojení amplitudového modulátoru je na obr. 26. Možnost nastavení míry potlačení nosného signálu na výstupu lze uskutečnit potenciometrem, podle zapojení ve schématu. V jedné krajní poloze zůstává nosný signál zcela zachován (DSB) a v druhé zcela redukován (DSB RC). Vše lze vidět na výstupních grafech. Pro redukovanou nosnou obr. 28 a příslušné spektrum obr. 29. Pro modulaci se zachovanou nosnou vlnou obr. 30 a příslušné spektrum obr. 31.



## 7. Demodulace AM signálů.

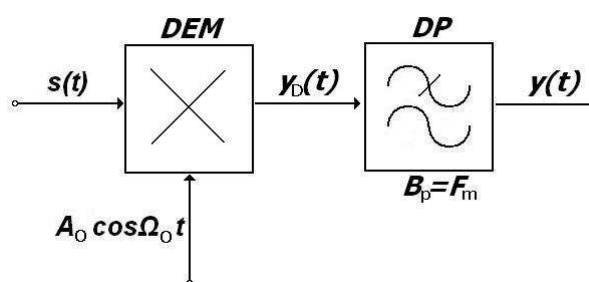
Signál, který byl na vysílací straně převeden modulací ze základní do vyšší frekvenční polohy, je nutné na přijímací straně převést zpět do původní základní polohy, a tak získat původní modulační signál  $s(x)$ . Takový inverzní proces k modulaci se nazývá demodulace také detekce. V některých případech zase požadujeme přesunutí modulovaného signálu  $s(t)$  z jedné vyšší polohy do jiné frekvenční polohy, často nazývané mezifrekvence (bez vydělení modulačního signálu). Taková operace bývá nazývána frekvenční konverze nebo směšování.

Ve všech těchto případech jde o přesunutí spektra, a proto je lze realizovat na dříve uvedených principech lineární modulace. Při demodulaci je pak třeba rozlišovat všechny typy modulace. Demodulace u systémů s potlačenou nosnou frekvencí a demodulace u systémů s přenosem nosné frekvence.

### 7.1. Demodulace s redukovanou nosnou vlnou

V těchto případech musí být nosný signál generován v místním oscilátoru na přijímací straně a dodán do demodulátoru. Přitom se vyžaduje shodnost frekvence a fáze s nosným signálem na vysílací straně. Proto se příslušná demodulace nazývá synchronní (též koherentní).

Teoreticky stačí vytvořit součin přijatého modulovaného signálu  $s(t)$  a místního nosného signálu  $A_0 \cos \Omega_0 t$ . Proto se také nazývá součinnová detekce. Demodulace má v těchto případech charakter modulace, demodulátor má stejnou strukturu jako modulátor



Obr. 32: Synchronní demodulace

V praxi nebude synchronizace dokonalá. Provedeme analýzu vlivu asynchronismu na demodulovaný signál dvoupásmové modulace (DSB). Vycházíme ze schématu uvedeného na obr. 32. Přijímaný signál DSB

$$s(t) = \cos(\Omega t + \varphi) \quad (7.1)$$

Nosný signál dodaný z místního oscilátoru

$$n_0(z) = A_0 \cos(\Omega_0 t + \varphi_0) \quad (7.2)$$

Na výstupu demodulátoru DEM bude

$$y_D(t) = s(t)n_0(t) = A_0x(t)\cos(\Omega t + \varphi)\cos(\Omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$y_D(t) = \frac{1}{2}A_0x(t)\{\cos[(\Omega - \Omega_0)t + \varphi - \varphi_0] + \cos[(\Omega + \Omega_0)t + \varphi + \varphi_0]\} \quad (7.3)$$

Bude-li místní nosný signál synchronizován s přijímaným signálem ( $F_0 = F$  a  $\varphi_0 = \varphi$ ), dostaneme

$$y_D(t) = \frac{1}{2}A_0x(t) + \frac{1}{2}A_0x(t)\cos(2\Omega t + 2\varphi) \quad (7.4)$$

Na výstupu demodulátoru DEM se objeví původní modulační signál  $x(t)$  – první člen – a dále signál se spektrem posunutým do okolí frekvence  $2F$  – druhý člen, který lze potlačit dolní propustí DP.

a) Bude-li existovat fázová chyba, bude  $\varphi_0 \neq \varphi$ ,  $F_0 = F$ . Potom dostaneme

$$y_D(t) = \frac{1}{2}A_0x(t)\cos(\varphi - \varphi_0) + \frac{1}{2}A_0x(t)\cos(2\Omega t + \varphi + \varphi_0) \quad (7.5)$$

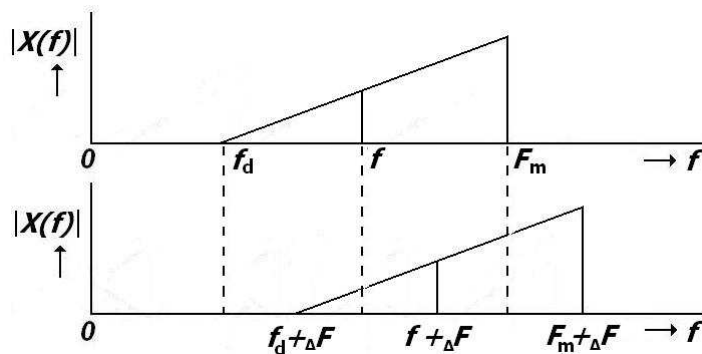
Užitečný signál  $x(t)$  na výstupu demodulátoru (první člen) je nyní násoben funkcí  $\cos(\varphi - \varphi_0)$ . Z toho plyne, že se změnou fázové chyby  $(\varphi - \varphi_0)$  se bude měnit intenzita získaného demodulovaného signálu. Pro  $(\varphi - \varphi_0) = \frac{\pi}{2}$  bude dokonce úplně potlačen. Pomalé změny fázové chyby  $(\varphi - \varphi_0)$  se projeví kolísáním intenzity přijímaného signálu. Bude-li  $(\varphi - \varphi_0) = konst$ , neprojeví se zkreslení. V praxi se fázová chyba  $(\varphi - \varphi_0)$  mění obvykle náhodně.

b) Bude-li existovat frekvenční chyba  $\Delta F = F_0 - F$ , dostaneme pro  $\varphi - \varphi_0 = 0$

$$y_D(t) = \frac{1}{2}A_0x(t)\cos\Omega t \cos(\Omega + \Delta\Omega)t =$$

$$y_D(t) = \frac{1}{2}A_0x(t)\cos\Delta\Omega t + \frac{1}{2}A_0x(t)\cos(2\Omega + \Delta\Omega)t \quad (7.6)$$

První člen reprezentuje užitečný nemodulovaný signál  $x(t)$ , jehož spektrum  $X(f)$  je ale posunuto o hodnotu  $\Delta F$  (každá frekvenční složka spektra je posunuta o  $\Delta F$ ) obr. 33.

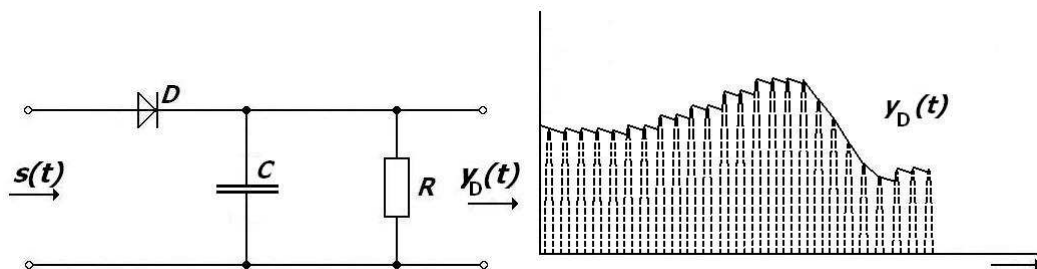


Při velmi malých hodnotách  $\Delta F < 1 \text{ Hz}$  se vliv činitele  $\frac{1}{2} A_0 \cos \Delta \Omega t$  v rovnici projeví harmonickým kolísáním intenzity (např. hlasitosti) nemodulovaného signálu  $x(t)$ . Dojev bude záviset na intenzitě činitele  $\frac{1}{2} A_0 x(t)$ .

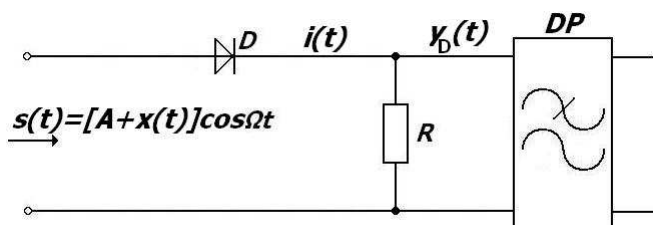
V praxi bude přípustná velikost difference  $\Delta F$  záviset na druhu přenášeného signálu. Např. při přenosu řeči lze připustit difference  $\Delta F$  i několik desítek hertzů. Při přenosu hudebních nebo datových signálů se připouští difference  $\Delta F = 1 \text{ až } 2 \text{ Hz}$ . Např. dva tóny s frekvencemi  $f_1$  a  $f_2 = 2f_1$ , které jsou na vysílací straně v harmonickém poměru, budou přijaty jako tóny s frekvencemi  $f'_1 = (f_1 + \Delta F)$  a  $f'_2 = (2f_1 + \Delta F)$ , které již v harmonickém poměru nejsou. To se zvlášť rušivé projeví u hudby. Obdobně se uplatní asynchronnost při demodulaci signálu jednopásmové modulační (SSB). Požadavek udržení nepatrné difference nosných frekvencí na přijímací a vysílací straně klade zvýšené nároky na realizace přijímače.

## 7.2. Demodulace s nosnou vlnou

Jestliže přenášený lineárně modulovaný signál obsahuje též nosnou frekvenci, je teoreticky možné realizovat demodulaci opět jako synchronní, ale prakticky se realizuje mnohem jednodušeji. Rozšířený je detektor obálky obr. 34, jehož výstup je velmi blízký obálce signálu AM. Dioda D pracuje v režimu lomené lineární charakteristiky.



Obr. 34: Obávkový detektor



Obr. 35: Kvadratický detektor

Pro malé signály lze použít kvadratický detektor obr. 35. Proud procházející diodou  $i(t)$  můžeme vyjádřit mocninovou řadou. Uvážíme-li její první dva členy, dostaneme pro výstupní napětí  $y_D(t)$ , které je úměrné proudu  $i(t)$

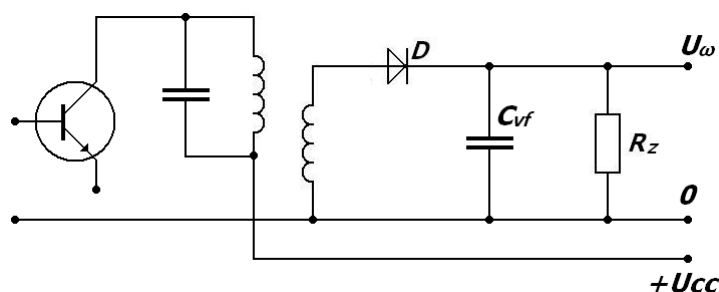
$$\begin{aligned}
 y_D(t) &= a_1 s(t) + a_2 s^2(t) = \\
 y_D(t) &= a_1 [A + x(t)] \cos \Omega t + a_2 \{[A + x(t)] \cos \Omega t\}^2 = \\
 y_D(t) &= \\
 a_1 A \cos \Omega t + a_1 x(t) \cos \Omega t + a_2 A^2 \cos^2 \Omega t + a_2 x^2(t) \cos^2 \Omega t + A x(t) \cos 2\Omega t + \\
 &+ A x(t)
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Na zátěži  $R$  se tedy mimo jiné objeví také modulační signál (poslední člen), který oddělíme od ostatních produktů dolní propustí DP.

### 7.3. Diodové demodulátory

Podle zapojení diody rozlišujeme demodulátory sériové a paralelní. V obou případech dioda funguje jako usměrňovací ventil, který propouští pouze jednu půlvlnu přicházejícího signálu AM. Dioda by měla mít co nejmenší prahové napětí, minimální kapacitu, co nejmenší odpor v propustném směru a co největší odpor v závěrném směru.

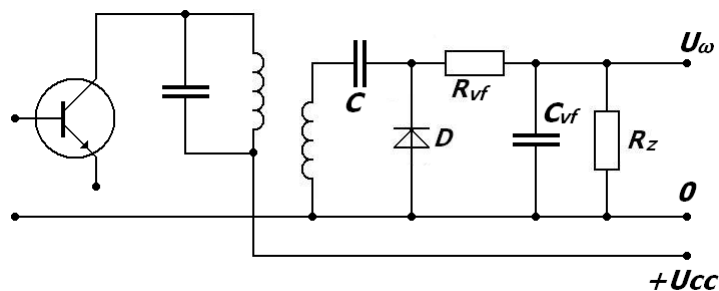
#### a) Sériový demodulátor



Obr. 36: Schéma zapojení sériového demodulátoru

U sériového demodulátoru na obr. 36 se signál AM dostává na diodový usměrňovač z vazebního vinutí zatěžovacího rezonančního obvodu posledního stupně vysokofrekvenčního zesilovače. Překročí-li tento signál prahové napětí diody  $U_{D0}$ , dioda se jím otevírá a propouští proudové impulsy do integračního kondenzátoru  $C_{vf}$ , jenž je vybíjen zatěžovacím rezistorem (jeho část může být tvořena vstupním odporem následujícího nízkofrekvenčního zesilovače). Velikost kondenzátoru  $C_{vf}$  smí být pouze tak velká, aby nebylo znehodnoceno výstupní napětí (při extrémně velké kapacitě by na výstupu demodulátoru zůstala pouze stejnosměrná složka). Je též zřejmé, že vstupní napětí demodulátoru musí být značné, aby při funkci nevadilo prahové napětí diody  $U_{D0}$ .

### b) Paralelní demodulátor



Obr. 37: Schéma zapojení paralelního demodulátoru

U paralelního demodulátoru na obr. 37 se signál AM dostává na diodový usměrňovač z vazebního vinutí zatěžovacího rezonančního obvodu posledního stupně vysokofrekvenčního zesilovače (vazební vinutí má oproti cívce laděného obvodu daleko méně závitů s ohledem na celkové tlumení rezonančního obvodu) přes vazební kondenzátor  $C$ , který se v jedné půlplni AM signálového napětí nabíjí a v druhé půlplni opět vybíjí přes zatěžovací odpor, navázaný přes integrační člen  $R_{vf}$ ,  $C_{vf}$ . Na výstupu demodulátoru se tak podobně jako v případě sériového diodového demodulátoru objevuje napětí nesoucí potřebnou informaci  $u_\omega$ . Integrační obvod nesmí mít příliš velkou časovou konstantu, aby nedošlo ke ztrátě informace (při příliš velké časové konstantě by se na výstupu objevilo pouze stejnosměrné napětí, úměrné velikosti přiváděného signálu). Uvedené zapojení má výhodu v teplotní kompenzaci posuvu ohybu charakteristiky diody s teplotou.

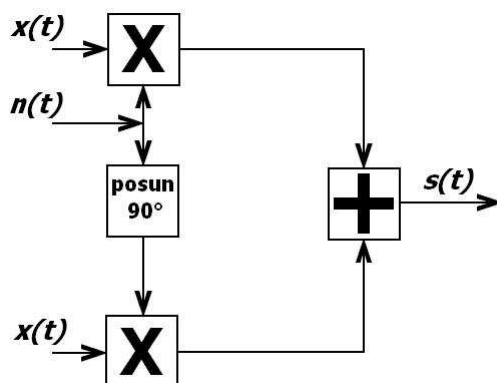
## 8. Telekomunikační systémy

Dnešní mnohokanálové přenosové systémy s frekvenčním dělením kanálů používají výhradně jednopásmový přenos. Dvoupásmový přenos se používá u levných jednoduchých systémů a u malokanálových systémů. Systém s nesymetricky potlačeným pásmem se používá při přenosu signálů s nulovou nebo velmi nízkou dolní frekvencí modulačního signálu, kdy by potlačení jednoho pásma bylo velmi náročné. V praxi se používá pro přenos televizního signálu nebo datových signálů.

### 8.1. Rozhlasový a televizní příjem

V televizních soustavách PAL a NTSC se uplatňuje kvadrurní amplitudová modulace. Kvadrurní amplitudová modulace QAM používá dvě nosné vlny, které mají přesně stejné kmitočty a amplitudy, avšak vzájemný fázový posun  $90^\circ$  (tzn. jsou v kvadratuře – odtud název modulace). Každá z nosných vln je potom modulována samostatným modulačním signálem  $x(t)$ . V praxi se často vyskytuje varianta modulace QAM, kde jsou obě nosné zcela potlačeny, přenášejí se pouze jejich postranní modulační pásma. Blokové schéma analogové kvadrurní amplitudové modulace je znázorněno na obr. 38. V horním násobiči se násobí modulační signál kosinusovou referenční vlnou, podobně v dolní části vzniká signál násobením sinusovou vlnou. V součtovém členu pak vzniká výsledný signál QAM, matematicky vyjádřený

$$s(t) = x_1(t) \cos \Omega t + x_2(t) \sin \Omega t \quad (8.1)$$



Obr. 38: Kvadrurní amplitudový modulátor

Vysílače českého rozhlasu v pásmu SV a DV vlnách, vysílaných amplitudovou modulací.  
Seřazeny podle frekvence.

Místo	Umístění vysílače	Program	frekvence [kHz]
Topolná	Uherské Hradiště	Radiožurnál	270
Lipno	Bližná	ČRo Č.Budějovice	558
Tachov	Právo	ČRo Plzeň	558
Broumov	Rožmitál	ČRo H.Králové	558
Praha	Liblice	Praha	639
Ostrava	Svinov	Praha	639
Liblice	Praha	Praha	639
Ostrava	Svinov	ČRo Ostrava	846
Strakonice	Radomyšl	Praha	864
Brno	Komárov	Praha	900
Č.Budějovice	Č.Budějovice	Praha	954
Přeštice	Žerovice	Praha	954
Karlovy Vary	Stará Role	Praha	954
Liberec	Vratislavice	Praha	954
Brno	Dobrochov	Praha	954
Jihlava	Větrník	Praha	981
Hradec Králové	Stěžery	Radio Svob. Evropa	1071
Mor. Budějovice	Domamil	Radio Svob. Evropa	1071
Mělník	Chloumek	Radio Svob. Evropa	1233
Ostrava	Svinov	Radio Svob. Evropa	1233
Brno	Komárov	Radio Svob. Evropa	1233
Brno	Dobrochov	Radio Svob. Evropa	1233
Jihlava	Větrník	Radio Svob. Evropa	1233
Č.Budějovice	Husova kolonie	Radio Svob. Evropa	1287
Strakonice	Radomyšl	Radio Svob. Evropa	1287
Přeštice	Žerovice	Radio Svob. Evropa	1287
Karlovy Vary	Stará Role	Radio Svob. Evropa	1287
Liberec	Vratislavice	Radio Svob. Evropa	1287
Litomyšl	Pohodlí	Radio Svob. Evropa	1287
Mor. Budějovice	Domamil	Praha	1332

Tab. 01: Vysílače českého rozhlasu – SV a DV

## 9. Praktická část

Praktickou část mám rozdělenou na 3 hlavní části.

V první části rozebírám mou navrhnutou simulaci amplitudové modulace v programu LabVIEW 8.0 od National Instruments. Dá se v ní simulovat tři druhy modulace (s nosnou vlnou, s redukovanou nosnou a s manuálním nastavením míry potlačení nosné). V části měření popisují a prakticky zkouším 3 diodové modulátory. Kruhový, jedno a dvoucestný. Jsou všechny s redukovanou nosnou vlnou. V třetí části porovnávám vytvořené grafy jednotlivých druhů modulace. U modulace se zachovanou nosnou vlnou jsem musel za modulátor připojit součtový člen, aby zůstala nosná zachována. Všechny tři diodové modulátory nosnou plně redukují.



## 9.1. Simulace pomocí programu LabVIEW



Pro simulaci amplitudové modulace jsem zvolil program LabVIEW 8.0 od National Instruments. Hlavní panel zobrazující grafy vstupních a výstupního signálu a nastavení druhu modulace a vlastností vstupních signálů. Je uveden níže na obr. 39. Celý program je vložen do cyklu *While Loop* s přivedeným tlačítkem stop, který slouží k ukončení běžícího programu. Hlavní jednotkou je cyklus *Math Script*, ve kterém jsou vepsány funkce. Prvním řádkem je:

$$t = 0:0.01:10 \quad (9.1)$$

Slouží k vytvoření časové osy od 0 do 10 s krokem 0.01. Dále jsou matematickým vzorcem definované vstupní signály, nosná vlna

$$nosna = Ac * \cos(fc * t + Pc * 2 * \pi); \quad (9.2)$$

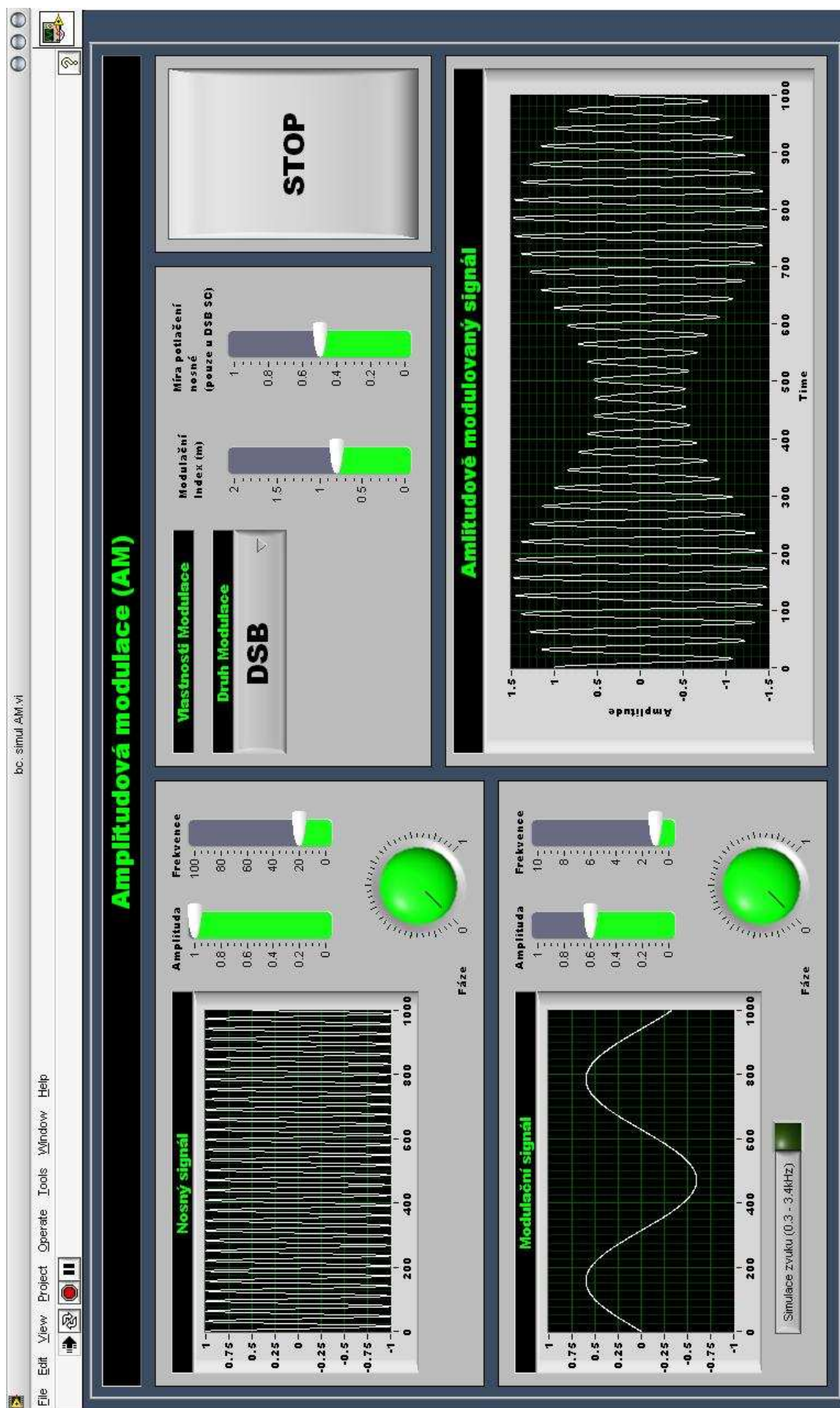
a modulační signál

$$modulacni = A * \sin(f * t + P * 2 * \pi); \quad (9.3)$$

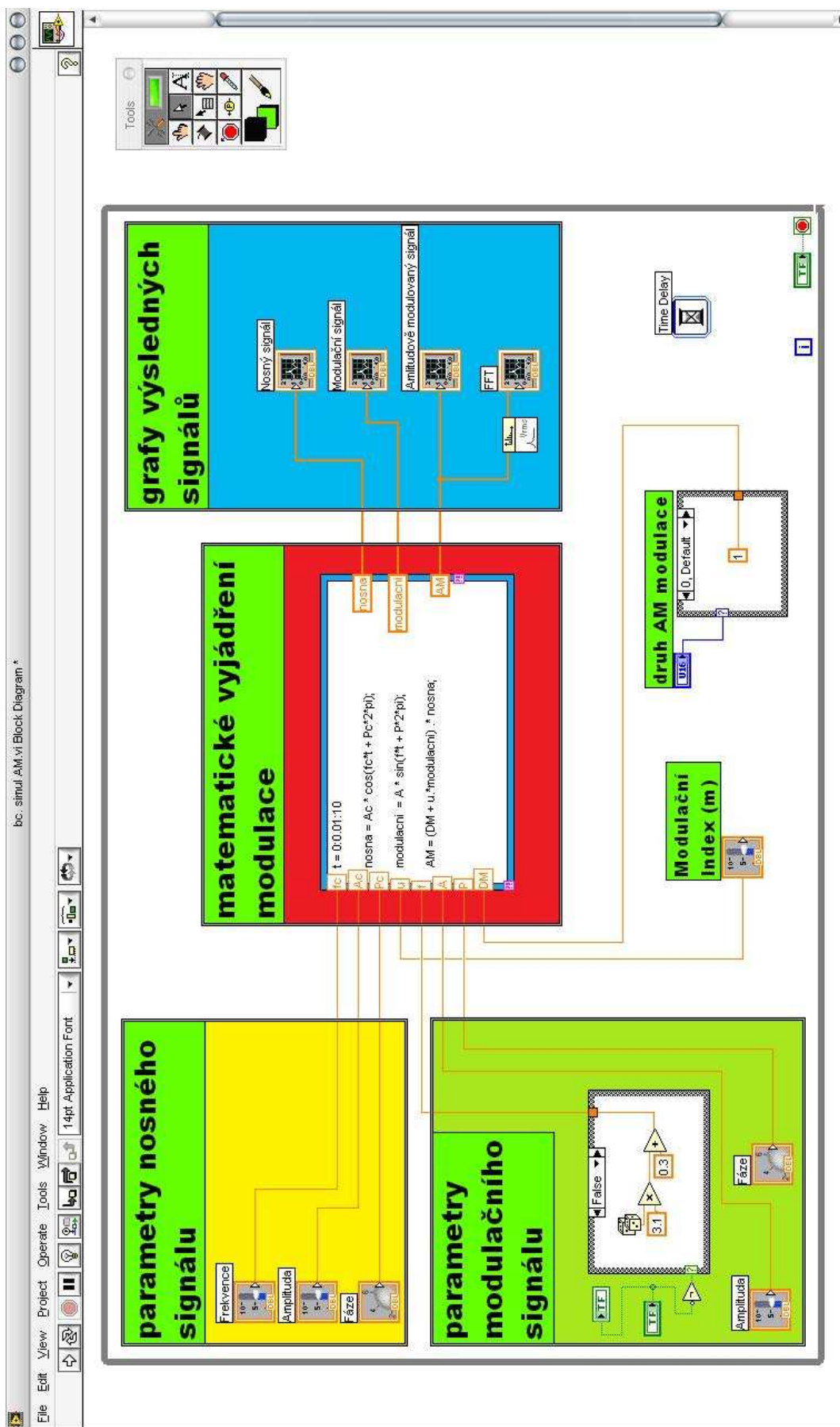
tyto příkazy jsou zakončeny středníkem. Poslední je funkce amplitudové modulace

$$AM = (DM + u.* modulacni) .* nosna;$$

Do celého cyklu jsou přivedeny vstupy a výstupy ovládající hodnoty v použitých vzorcích. Vstupní hodnoty nosné vlny a tak i stejně u modulačního signálu jsou vedeny z příslušných nastavitelných číselných vstupů. Které nám slouží k nastavení potřebné informace signálu (frekvence, amplituda a fáze). A dále modulační index určující míru modulace a druh modulace značená DM. Ta je vytvořena *Case Structure* kde jsem přidáním case vytvořil 3 okna, v nichž každém jinak číselně vyjádřil druh modulace. U DSB RC jsem DM přiřadil hodnotu 0, u DSB hodnotu 1 a u DSB SC jsem použil otočnou nastavitelný potenciometr jdoucí od nuly k jedné. Sloužící c manuální nastavení míry potlačení nosné vlny. Celý *Case Structure* je přiveden na třístavové výběrové tlačítko kterým na hlavním panelu vybírám druh modulace. Z *Math Script* jsou vyvedeny výstupní funkce k zobrazení na *Waveform Graph*. Spektrum signálu je vytvořen modulem *Amplitude Spectrum*. Celý systém je řízen rychlostí nastavená v *Time Delay* na 0.01.



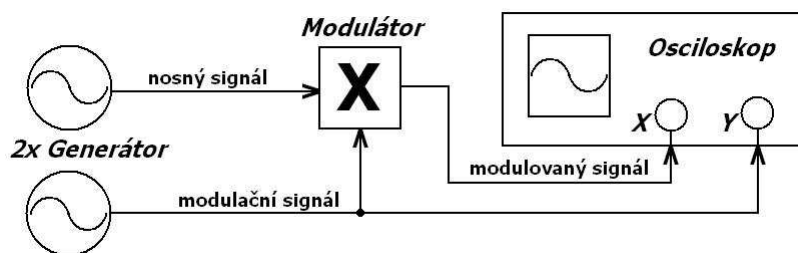
Obr. 39: Hlavní panem vytvořeného simulátoru amplitudové modulace



Obr. 40: Schéma zapojení simulace amplitudové modulační

## 9.2. Měření amplitudové modulace na osciloskopu

K měření převodních charakteristik modulátorů jsem použil zapojení na obr. 41.



Obr. 41: Blokové schéma zapojení měření diodových modulátorů

Pro měření jsem zvolil dva generátory harmonického signálu a osciloskopy Tektronix TD 2002B a Rigor DS1102c.



Obr. 42: Osciloskop Tektronix TDS 2002 B

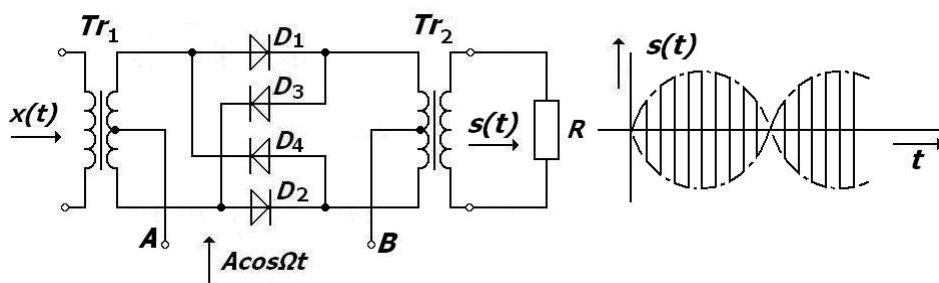


Obr. 43: Osciloskop Rigor DS1102c

### 9.2.1. Měření kruhového diodového modulátoru

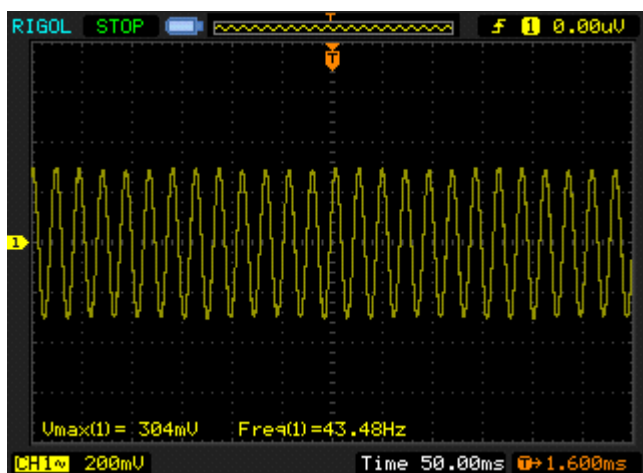
Tento modulátor slouží k vytvoření modulovaného signálu s potlačenou nosnou vlnou.

DSB RC

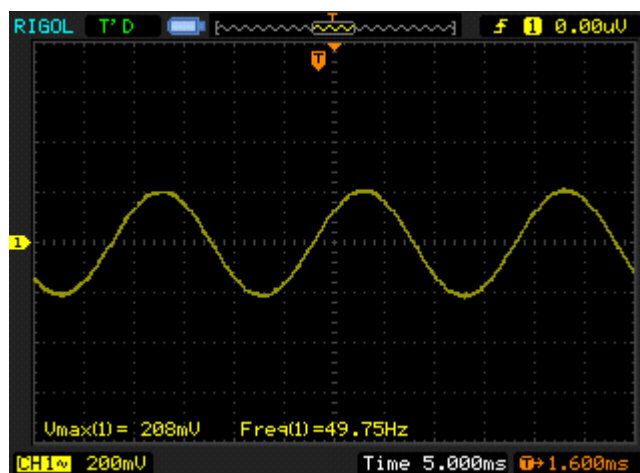


Obr. 44: Schéma zapojení kruhového diodového modulátoru

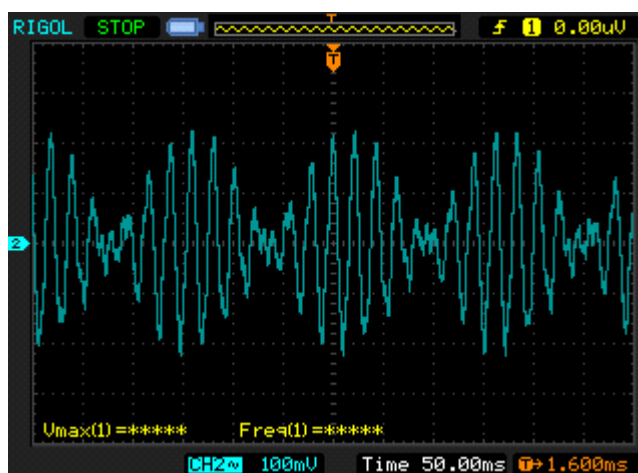
K měření jsem použil diody s označením BA479G a dva modulační transformátory s vyvedeným středem. Po zapojení a nastavení modulátoru jsem na jednom z generátorů nastavil tvar a frekvenci nosného signálu. Na druhý modulační signál taktéž sinusového průběhu. Na obr. 45. Je vidět výstup osciloskopu nosného signálu.



Obr. 45: Nosný sinusový signál

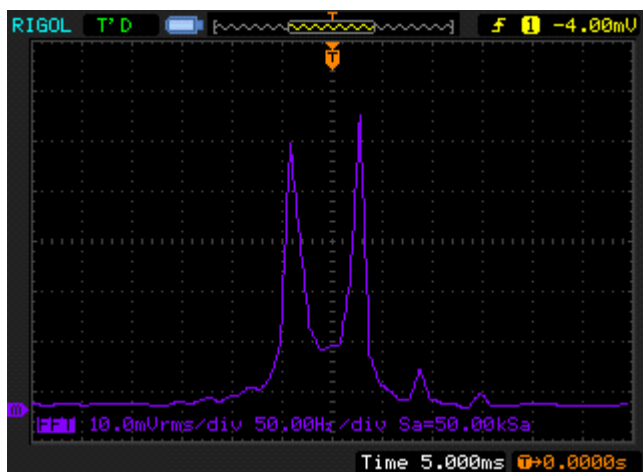


Obr. 46: Modulační signál

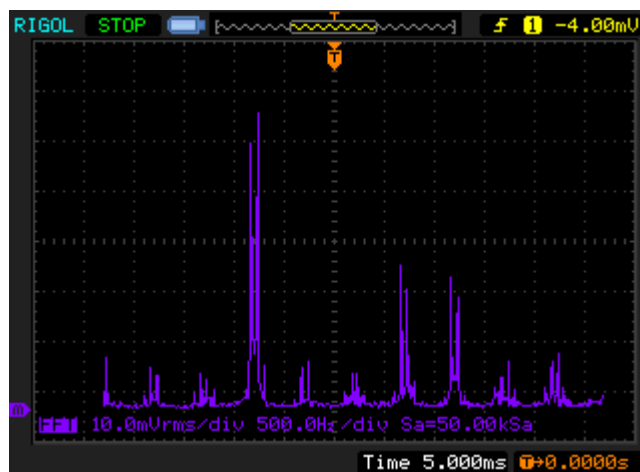


Obr. 47: Modulovaný signál





Obr. 48: Spektrum signálu (výřez)

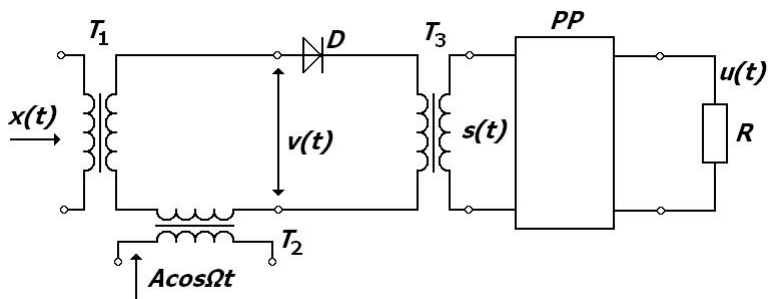


Obr. 49: Spektrum modulovaného signálu

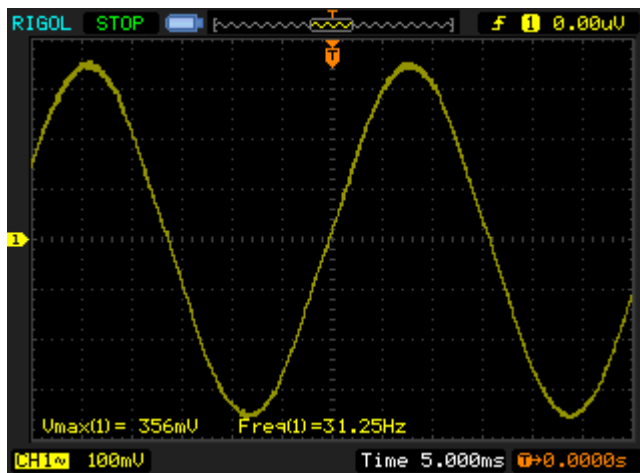
Na obr. 48 je výřez spektrum modulovaného signálu s potlačenou nosnou vlnou. Jdou vidět dva vrcholy, což je levé a pravé pásmo. Na obr. 49 je celé spektrum signálu. Objevují se po modulaci i násobky harmonických. Proto se za tímto modulátorem používá pásmová propust, která odstraní tyto nežádoucí frekvenční špičky. Dle grafu na obr. 47 je vidět nejkvalitnější průběh z mých třech testovaných modulátorů.

### 9.2.2. Měření jednocestného diodového modulátoru

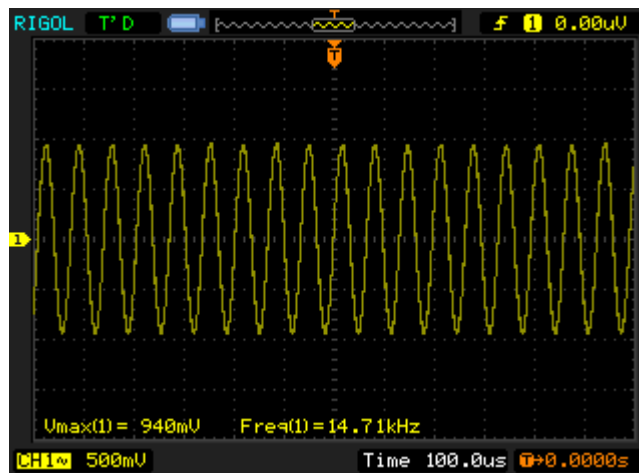
Nejjednodušší praktická realizace modulátoru. Využívá pouze jednu diodu a dva transformátory s vyvedeným středem a jeden obyčejný na vstupu nosného signálu. U tohoto zapojení dochází k největším zkreslením signálu. Z měření byla výsledkem nerovnoměrná modulace a spektrum s větším počtem nepatřičných vlivů. Spektrum modulovaného signálu zobrazovalo pouze jednu hlavní špičku s velkým šumem. Na osciloskopu výstupní modulačního signálu (na obr. 54), je takřka dostatečný v praktickém využití.



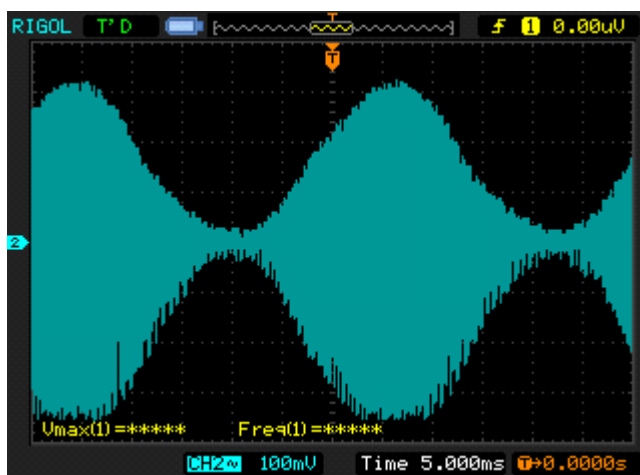
Obr. 50: Schéma zapojení jednocestného diodového modulátoru



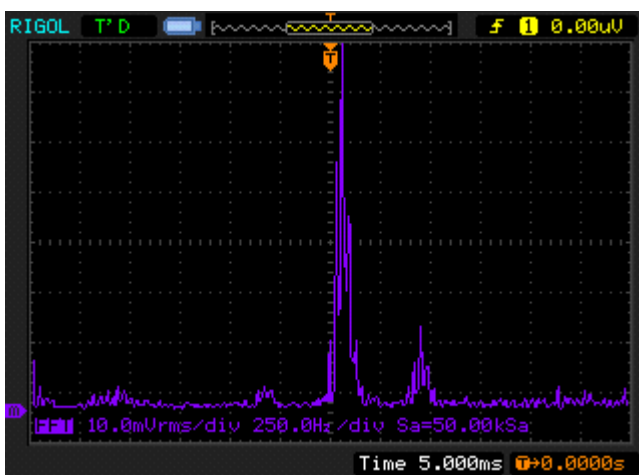
Obr. 52: Vstupní modulační signál



Obr. 53: Vstupní nosný signál



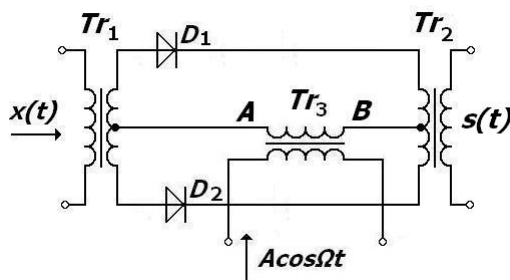
Obr. 54: Výstupní modulovaný signál



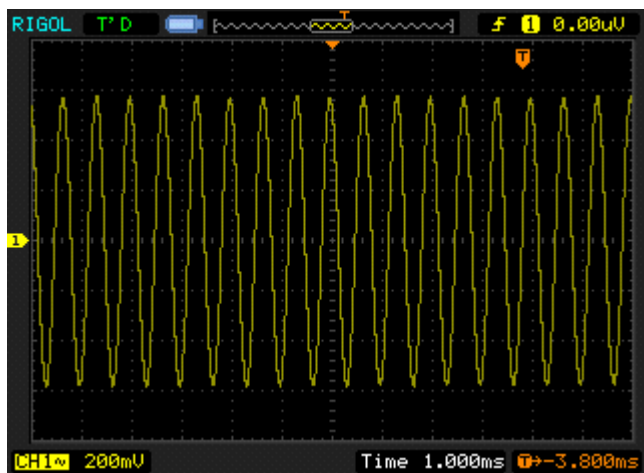
Obr. 55: Spektrum modulovaného signálu

### 9.2.3. Měření dvoucestného diodového modulátoru

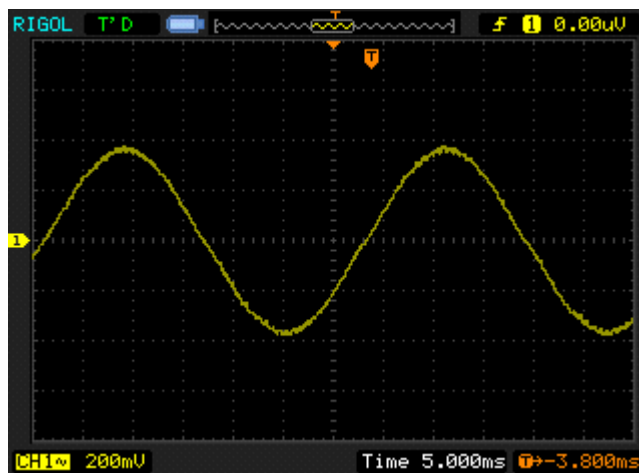
Tento modulátor slouží k vytvoření modulovaného signálu s potlačenou nosnou vlnou DSB RC. Obsahuje dvě diody, každou v jedné straně. Dva modulační transformátory s vyvedeným středem kde je zapojen obyčejný modulační transformátor který přivádí do zapojení nosný signál. V porovnání s jednocestným je už kvalitnější, ale musí být přesně sladěny parametry obou diod. V mém případě jsem použil obě diody s označením BA479G, ale i tak nebyly dokonale sladěny jejich parametry.



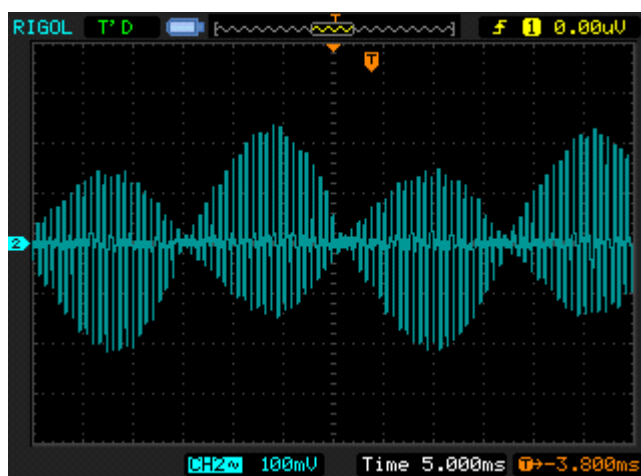
Obr. 56: Schéma zapojení dvoucestného diodového modulátoru



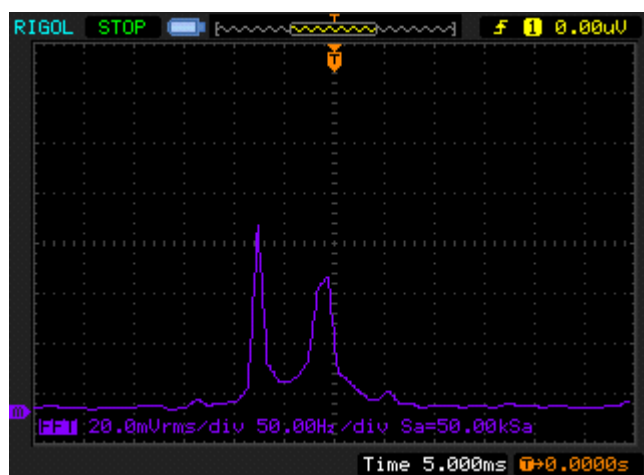
Obr. 57: Nosný signál



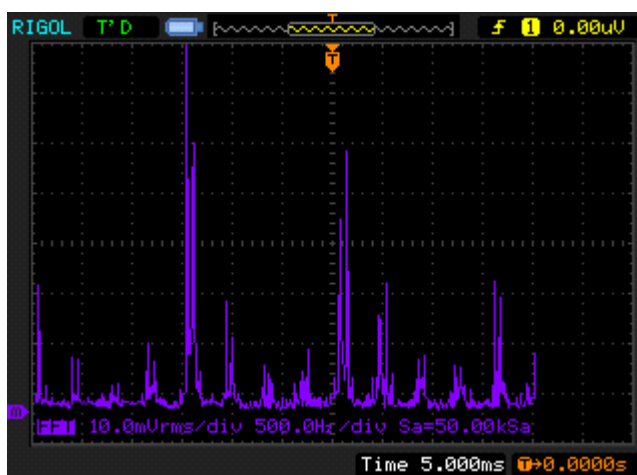
Obr. 58: Modulační signál



Obr. 59: Výstupní modulovaný signál dvoucestného diodového modulátoru



Obr. 60: Výřez spektra modulovaného signálu



Obr. 61: Celé spektrum modulovaného signálu

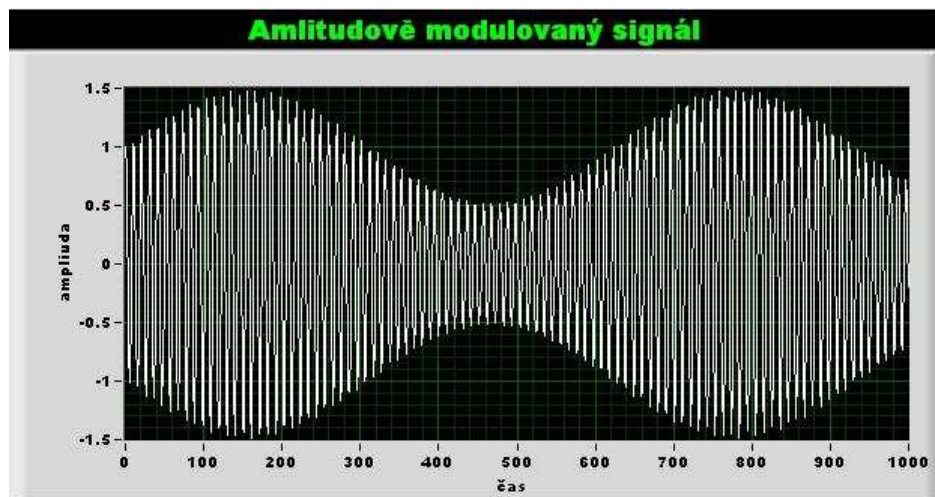
Při měření jednocestného modulátoru došlo k nesymetrii dvou vybraných diod. Horní a dolní část není úplně stejná. Dochází k nestejným amplitudám nosného signálu vycházející z jednotlivých diod. Na výřezu spektru jsou patrné 2 výběžky postranních pásem. V celé šíři spektra jdou vidět násobky harmonické vzniklé při modulaci. V praxi bývá za tímto modulátorem použita pásmová propust, která nežádoucí násobky utlumí.



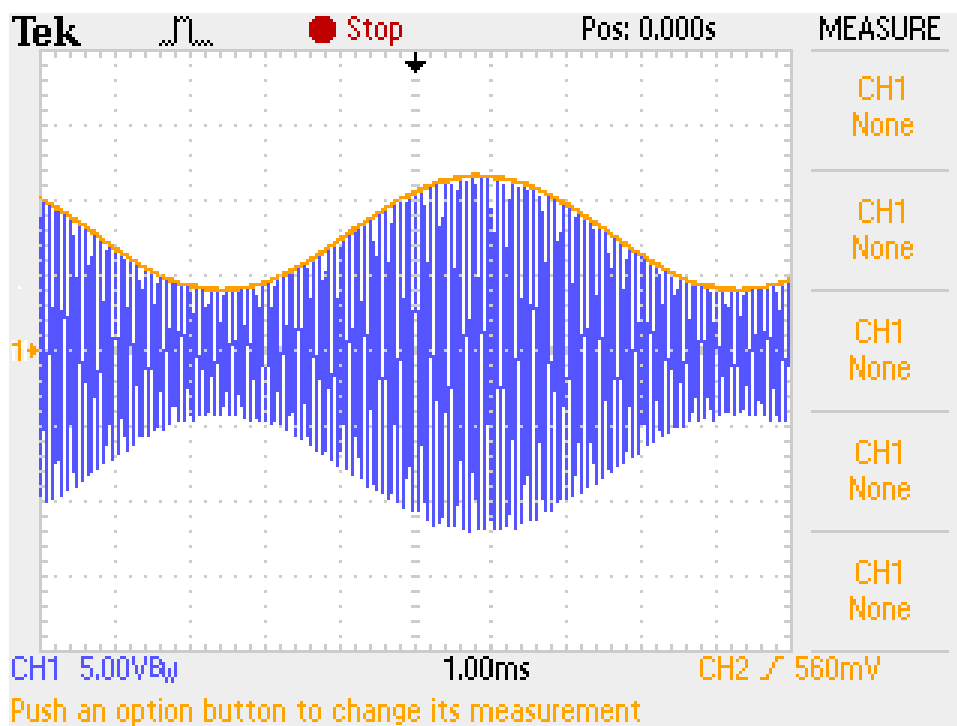
### 9.3. Porovnání simulovaných a naměřených charakteristik

#### DSB – Amplitudová modulace se zachovanou nosnou vlnou.

V simulaci je použita nosná frekvence s amplitudou 1V a frekvencí 60kHz. Modulační signál je s 60x nižší frekvencí 1kHz a amplitudě 0.6V. Modulační index je nastaven na 80%, což bývá klasická hodnota nastavení v praxi.

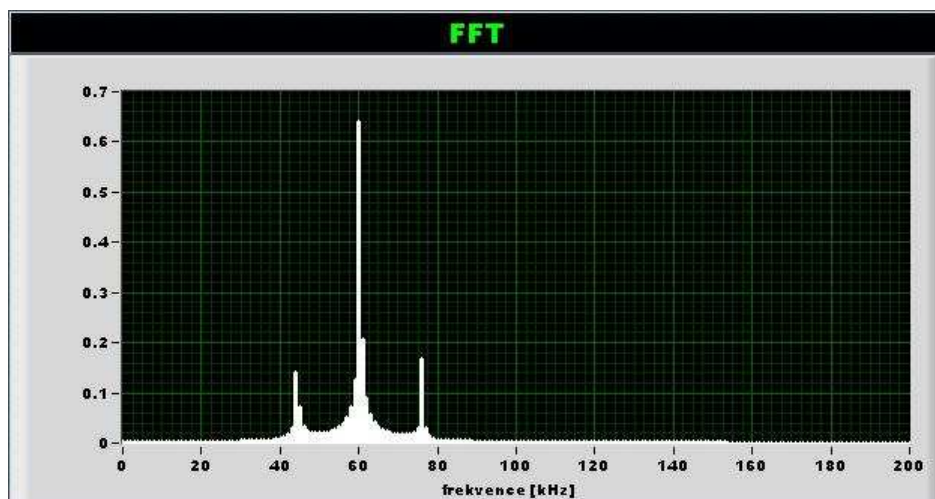


Obr. 62: Simulovaný modulovaný signál



Obr. 63: Naměřený modulovaný signál

Modulovaný signál je na obrázku znázorněn modrou barvou a vstupní modulační signál je znázorněn žlutou.



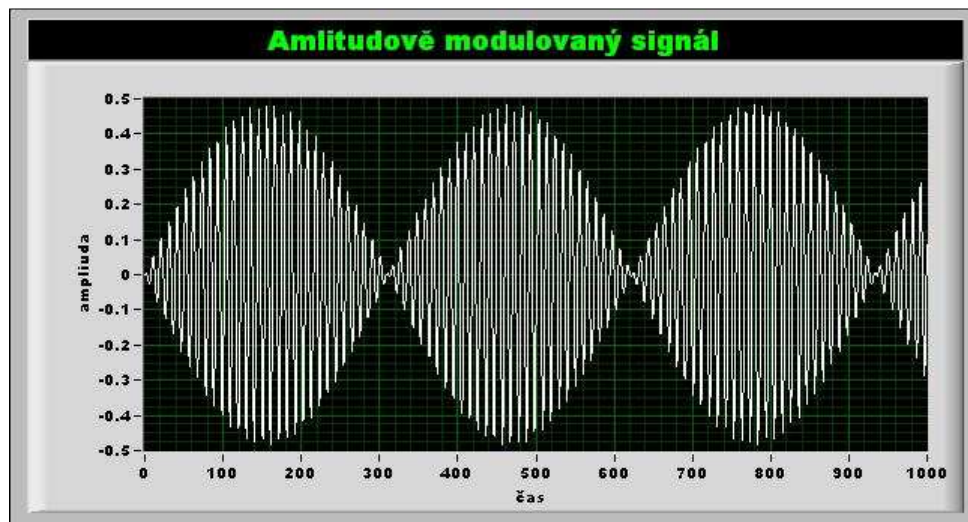
Obr. 64: Spektrum simulovaného signálu

Zde na spektru jde vidět, kde se nachází užitečný výkon. Prostřední výběžek spektra je nosný signál 60kHz. Je daleko vyšší než obě důležitá postranní pásma. Nenese žádnou informaci, proto bývá často redukován. Kdežto postranní pásma nám přenáší potřebnou informaci.

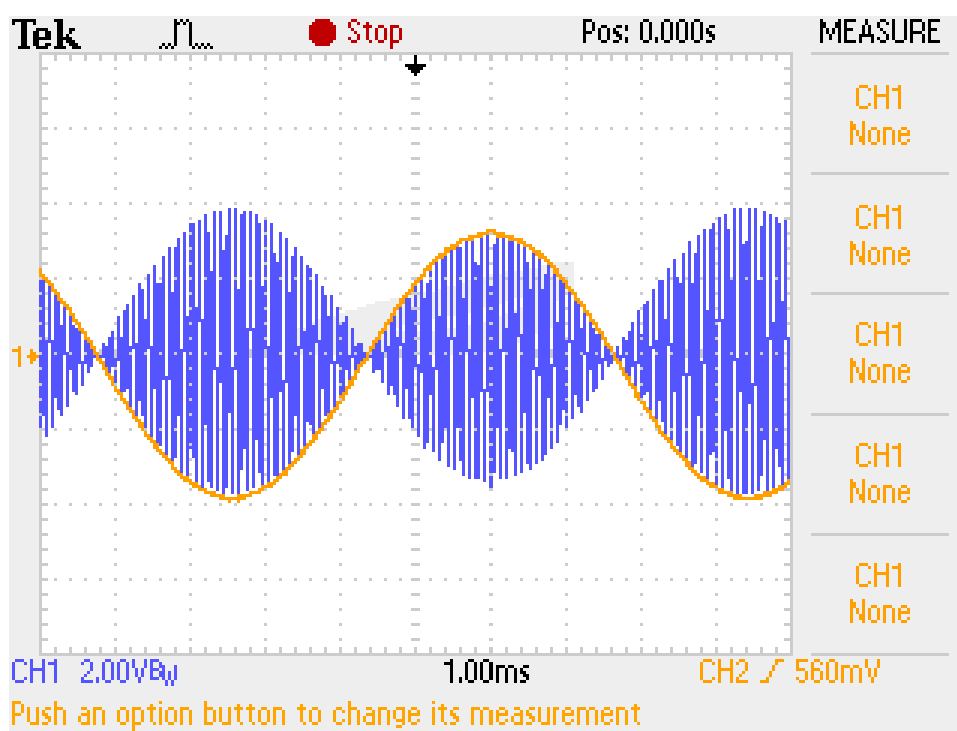
Z výsledků měření převodní charakteristiky amplitudového modulátoru a porovnání s grafy nasimulované modulace, jde vidět až na minimální změny totožné výsledky.

### DSB RC – Amplitudová modulace s redukovanou nosnou vlnou.

V simulaci je použita nosná frekvence s amplitudou 1V a frekvencí 60kHz. Modulační signál je s 60x nižší frekvencí 1kHz a amplitudě 0.6V. Modulační index je nastaven na 80%, což bývá klasická hodnota nastavení v praxi.

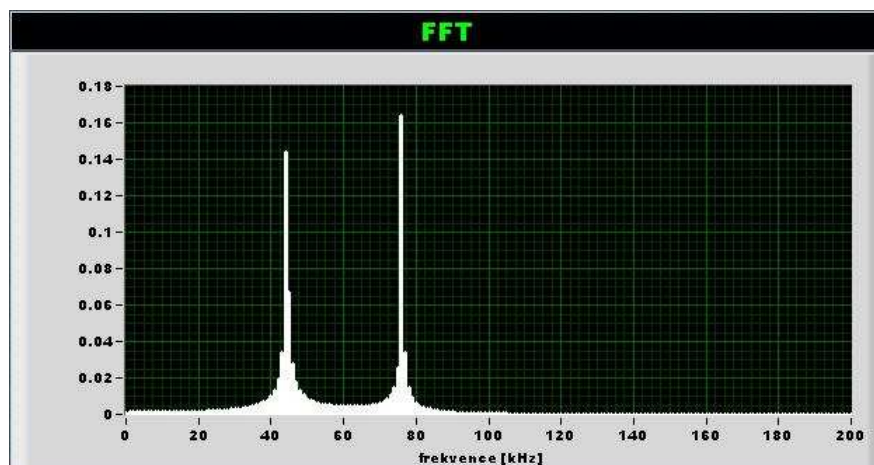


Obr. 65: Simulovaný modulovaný signál



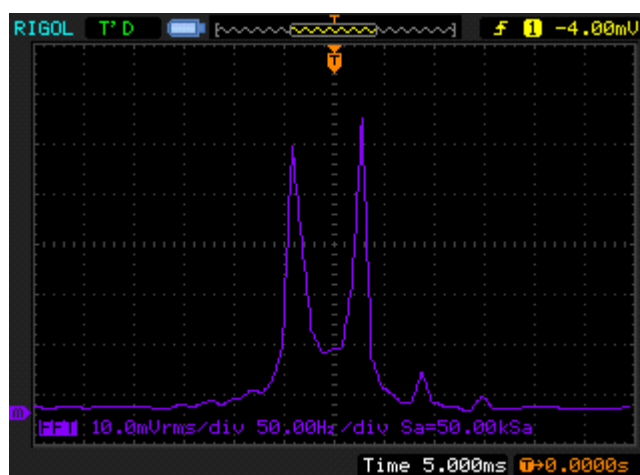
Obr. 66: Naměřený modulovaný signál

Modulovaný signál je na obrázku znázorněn modrou barvou a vstupní modulační signál je znázorněn žlutou. V místě průchodu modulačního signálu nulou dochází ke změně fáze o 180°.



Obr. 67: Spektrum simulovaného signálu

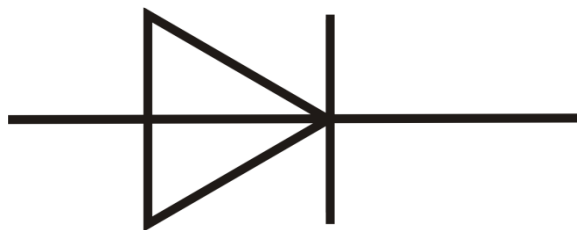
V tomto spektru zůstaly pouze postranní pásma a nosná vlna na místě 60kHz je odstraněna. Nyní se přenáší pouze užitečná složka ale dvakrát. I nárok na přenosové pásmo je dvojnásobné oproti modulačního signálu. Proto se někdy zapojením vhodným filtrem jedno pásmo odstraní a zůstává pouze jedno a zároveň lze použít poloviční přenosové pásmo.



Obr. 68: Spektrum měřeného signálu (kruhového diodového modulátoru)

Rozdíly mezi naměřenými a simulovanými výsledky nejsou takřka žádné rozdíly. Jen malý rozdíl na amplitudách jednotlivých obálek modulovaného signálu. Jeho příčinou byla nesymetrie použitých diod. Pro výběr diod použití v modulátorech by bylo lepší vybírat diody s větší přesností svých parametrů. I spektrum bylo na dobré úrovni. Byly dobře patrné obě postranní pásma s minimálním zkreslením.

## 10. Dioda



Obr. 68: Schematická značka diody

Dioda je polovodičová součástka ze dvou oblastí polovodiče: P a N. V nejběžnějším použití je využita vlastnost propouští proud jen jedním směrem. V mém případě dioda pracuje jako spínací.

Je to elektronická součástka se dvěma elektrodami. Termín dioda původně znamenal elektronku s dvěma pracovními vývody, které se nazývají katoda a anoda. Základní funkcí diody je, že dovoluje tok proudu směrem od anody ke katodě od velmi nízkého napětí, např. Schottkyho dioda 0,3V, křemíková dioda 0,7V. A ve směru opačném, tedy od katody k anodě, proud teče od vyššího napětí, Schottkyho dioda 70V.

### 10.1. Základní vlastnosti

#### Pracovní stavy diody:

Pokud je na katodě kladné napětí a na anodě záporné napětí je dioda zavřená, to znamená, že téměř neteče proud. V tomto stavu se dioda chová podobně jako rozepnutý spínač. Pokud závěrné napětí překročí konstrukční mez, může dojít k průrazu (což většinou znamená zničení diody).

Pokud je na katodě záporné napětí a na anodě kladné napětí, je dioda otevřená a proud může protékat téměř bez omezení. V tomto stavu je odpor nebo úbytek napětí na diodě malý. V tomto stavu se dioda chová podobně jako sepnutý spínač. Polovodičovou diodou začíná téct proud teprve po překonání tzv. bariérového napětí P-N přechodu. Pokud propustný proud překročí konstrukční mez, může dojít ke spálení diody

### 10.2. Druhy

#### Podle konstrukčního principu a účelu to může dioda být:

Polovodičová dioda – je založena na P-N přechodu, který dovoluje tok proudu pouze jedním směrem.

<b>Hrotová dioda</b>	– historicky nejstarší typ polovodičových diod, Základ krystalky
<b>Plošná dioda</b>	
<b>Schottkyho dioda</b>	– Nevyužívá P-N přechodu, ale přechodu kov-polovodič
<b>Elektronka</b>	– Opět se začaly vyrábět. Používají se např. v audio technice pro dosažení charakteristického "elektronkového" zvuku
<b>Dvojitá dioda</b>	– elektronka pro dvoucestné usměrnění

Některé polovodičové diody se nevyužívají pro usměrňování napětí, ale kvůli vedlejším jevům, ke kterým může při polovodičovém usměrňování docházet.

<b>Fotodioda</b>	– dopadající světelné nebo jiné záření způsobí v oblasti přechodu P-N vytvoření dvojice elektron – kladná díra, a tím podle způsobu zapojení dojde ke zvýšení vodivosti nebo ke zvýšení napětí na přechodu P-N
<b>LED</b>	– svítivá dioda. Rekombinace v oblasti přechodu P-N při průchodu proudem v propustném směru způsobují vydávání světelného záření
<b>Zenerova dioda</b>	– bývá konstruována tak, že v závěrném směru dochází při napětí několika voltů k nedestruktivnímu zenerovu průrazu. Díky tomu může fungovat jako stabilizátor napětí

**Tunelová dioda, Inverzní dioda**

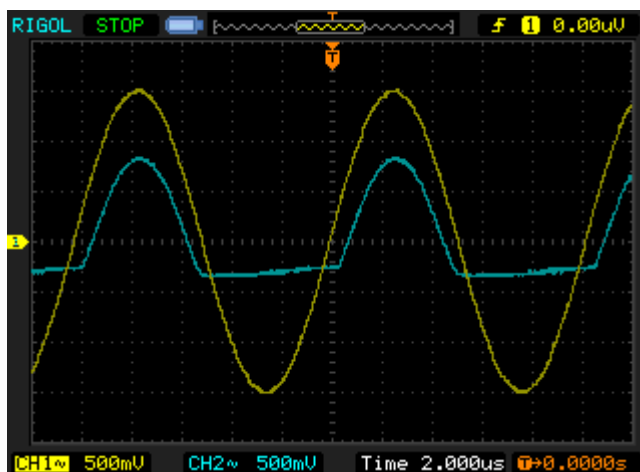
**Kapacitní dioda (varikap, varaktor)**

- je speciální dioda konstruovaná tak, aby měla větší kapacitu. S velikostí napětí na diodě se mírně mění její kapacita. Tohoto jevu se používá pro vytvoření řízené kapacity, např. v ladících obvodech rádiových přijímačů.

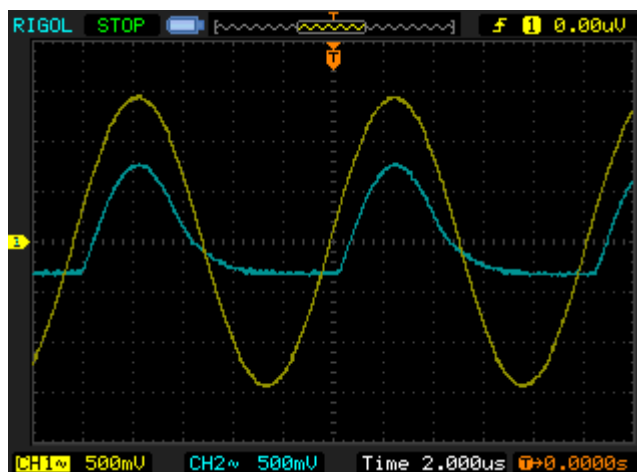
### **10.3. Frekvenční závislost modulačních diod - naměřené průběhy a vhodnost použití pro amplitudové modulátory**

V modulátorech se využívá diody jako spínače. Nejlepší je použití vysokofrekvenčních diod, které mají čas obnovy NP přechodu rychlý. Měření jsem zkoušel i diody usměrňovací, ale výsledky byly špatné, což jsem čekal. Jsou stavěny na frekvenci okolo 50 Hz a v modulátorech je několikrát násobně větší. Nestíhaly impulsy nosné frekvence vypínat v dostatečně rychlé době. Mnohdy nevypínaly vůbec. Zatím co rychle spínací diody byly na tom lépe. Ale vysokofrekvenční diody ostáli na výbornou. Proto jsou také v modulátorech nejlépe využity.

K měření jsem použil 4 druhy diod od klasické usměrňovací přes rychlou až po vysokofrekvenční diodu. Hodnoty grafů jsou pro kmitočet 100 kHz. Nejlépe na tom byla vysokofrekvenční dioda BA479G. Z touto frekvencí si poradila bez problémů. Na obr. 69 je převodní charakteristika této diody. Žlutou barvou je znázorněn vstupní signál do diody a modrou výstup. Rychlá dioda UF4007 byla na tom o kousek hůře ale v použití v modulátorech stále dobře použitelný (obr. 70).

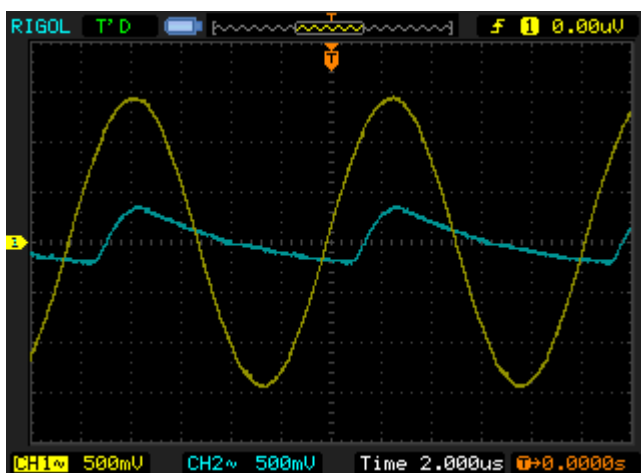


Obr. 69: Průběh diody BA479G

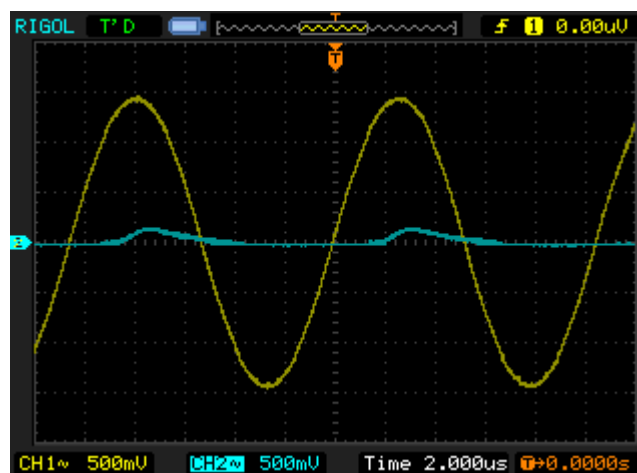


Obr. 70: Průběh diody UF4007

Rychlá dioda 1N4937 už nestíhala plně spínat a rozepínat. I výstupní maximální napětí bylo minimální, vůči předem zmíněných diod. Na obr. 71. Univerzální dioda 1N4148 už při této frekvenci nestíhala spínat. V modulátorech naprosto nepoužitelná. Je patrné na průběhu grafu na obr. 72.



Obr. 71: Průběh diody 1N4937



Obr. 72: Průběh diody 1N4148

## 11. Závěr

V této bakalářské práci jsem formuloval teorii samotné amplitudové modulace, vždy s matematickým popisem jednotlivého kroku. Ve výpočtech a praktické realizaci jsem používal modulační koeficient 0,8. V praxi nejvíce používána, proto tato volba. Základní vlastnosti jednotlivých druhů amplitudové modulace. Modulace s nosnou vlnou je jedna ze základních. Tato modulace se moc nevyužívá, protože vlastní poměr užitečného signálu je malý. Asi 80% výkonu je na nosné vlně v modulovaném signálu. A po 10% na levé a pravé postranní pásmo. Vše je nejlépe patrné na spektrech modulovaného signálu. A to na spektrech matematicky popsanych Fourierovou transformací i reálně změřených na osciloskopu. Proto se zavádí modulace s potlačeným nosným signálem. Zůstává zachovány pouze dvě postranní pásma. Užitečný výkon je už na dobré úrovni. Tuto modulaci vytvoří diodové modulátory. Ale přenášené pásmo je 2x větší než pásmo informace v modulovaném signálu. Levé pásmo je vlastním zrcadleným obrazem pravého pásma. Čímž docházelo k odfiltrováním nebo jinému principu, jak nepotřebné pásmo odstranit. Po takhle upraveném signálu se potřeba na šířku pásma 2x zmenšila. Vlastní realizace modulátorů je dosti různorodá. Nejvíce se používá polovodičových součástek v zapojení jako spínač. Diody, tranzistory a dříve různé elektronky. Ale dá se modulátor vytvořit i přes krystalový oscilátor. V dnešní době velké produkce integrovaných obvodů našla uplatnění i tato metoda. Různé firmy vytvářejí přímo modulátory zabudované v jediném čipu, nebo jeho hlavní část.

Mým úkolem byly diodové modulátory. Vybral jsem kruhové zapojení, jedno a dvoucestné zapojení. Všechny diodové modulátory redukuje nosnou vlnu.

Jednocestné zapojení je nejjednodušší praktická realizace modulátoru. Využívá pouze jednu diodu a dva transformátory s vyvedeným středem a jeden obyčejný na vstupu nosného signálu. U tohoto zapojení dochází k největším zkreslením signálu. Z měření byla výsledkem nerovnoměrná modulace a spektrum s větším počtem nepatřičných vlivů. Spektrum modulovaného signálu zobrazovalo pouze jednu hlavní špičku s velkým šumem. Na osciloskopu výstupní modulačního signálu je takřka dostatečný v praktickém využití.

Dvoucestné zapojení bylo na tom o poznání lépe. Obsahuje dvě diody, každou v jedné straně. Dva modulační transformátory s vyvedeným středem kde je zapojen obyčejný modulační transformátor který přivádí do zapojení nosný signál. V porovnání s jednocestným je už kvalitnější, ale musí být přesně sladěny parametry obou diod. V mém případě jsem použil obě diody s označením BA479G, ale i tak nebyly dokonale sladěny jejich parametry. Horní a dolní část modulovaného signálu nejsou úplně stejná. Dochází k nestejným amplitudám nosného signálu vycházející z jednotlivých diod. Na výřezu spektru jsou patrné 2 výběžky postranních pásem. V celé šíři spektra jdou vidět násobky harmonické vzniklé při modulaci. V praxi bývá za tímto modulátorem použita pásmová propust, která nežádoucí násobky utlumí.



Nejlépe na tom bylo kruhové zapojení. Na výřezu spektra modulovaného signálu s potlačenou nosnou vlnou jdou vidět dva vrcholy, což je levé a pravé pásmo. Na celém spektru signálu se objevují po modulaci i násobky harmonických. Proto se za tímto modulátorem používá pásmová propust, která odstraní tyto nežádoucí frekvenční špičky. Dle grafu modulovaného signálu je vidět nejkvalitnější průběh z mých třech testovaných modulátorů.

Dle mého posouzení je v praxi nejlepší vybrat kruhový modulátor. Sice obsahuje 4 diody, ale nebývají drahé. A pouze 2 modulační transformátory s vyvedeným středem. Jedno a dvoucestný diodový modulátor obsahoval tyto modulátory 3.

Aby byly dobře viditelné rozdíly u různých druhů amplitudové modulace, jsem pro srovnání modulaci amplitudovou simuloval v PC. Pro simulaci amplitudové modulace jsem zvolil program LabVIEW 8.0 od National Instruments. Obsahuje hlavní panel zobrazující grafy vstupních a výstupního signálu a nastavení druhu modulace a vlastností vstupních signálů. Možnost zadání modulačního koeficientu a má na výběr ze tří druhů modulace. Se zachovanou nosnou vlnou, s redukovanou a s manuálním nastavením míry potlačení. Obsahuje 2 vstupní grafy na zobrazení modulačního a nosného signálu. A výstupní modulovaný signál. Popřípadě spektrum tohoto signálu. V simulaci je použita nosná frekvence s amplitudou 1V a frekvenci 60kHz. Modulační signál je s 60x nižší frekvencí 1kHz a amplitudě 0.6V. Modulační index je nastaven na 80%, což bývá klasická hodnota nastavení v praxi.

U modulace se zachovanou nosnou jsem byl nucen za modulátor ještě přiřadit součtový člen, do kterého jsem přivedl modulovaný signál a znovu nosnou vlnu. Z důvodů, že diodové modulátory automaticky nosnou vlnu redukují. Na spektru jde vidět, kde se nachází užitečný výkon. Prostřední výběžek spektra je nosný signál. Je daleko vyšší než obě důležitá postranní pásma. Nenese žádnou informaci, proto bývá často redukován. Kdežto postranní pásma nám přenášejí potřebnou informaci. Z výsledků měření převodní charakteristiky amplitudového modulátoru a porovnání s grafy nasimulované modulace, jde vidět až na minimální změny totožné výsledky

U zapojení s potlačeným nosným signálem v místě průchodu modulačního signálu nulou dochází ke změně fáze o  $180^\circ$ . Ve spektru zůstaly pouze postranní pásma a nosná vlna je odstraněna. Nyní se přenáší pouze užitečná složka ale dvakrát. I nárok na přenosové pásmo je dvojnásobné oproti modulačního signálu. Proto se někdy zapojením vhodným filtrem jedno pásmo odstraní a zůstává pouze jedno a zároveň lze použít poloviční přenosové pásmo. Rozdíly mezi naměřenými a simulovanými výsledky nejsou takřka žádné rozdíly. Jen malé rozdíly na amplitudách jednotlivých obálek modulovaného signálu. Jeho příčinou byla nesymetrie použitých diod. Pro výběr diod použití v modulátorech by bylo lepší vybírat diody s větší přesností svých parametrů. I spektrum bylo na dobré úrovni. Byly dobře patrné obě postranní pásma s minimálním zkreslením.

Na závěr jsem testoval 4 vybrané diody, jejich chování a rychlost spínání které je hlavním parametrem při použití v diodovém modulátoru. V modulátorech se využívá diody jako spínače. Nejlepší je použití vysokofrekvenčních diod, které mají čas obnovy NP přechodu rychlý. K měření jsem použil 4 druhy diod od klasické usměrňovací přes rychlou až po vysokofrekvenční diodu. Diody usměrňovací, ale výsledky byly špatné, což jsem čekal. Jsou stavěny na frekvenci okolo 50 Hz a v modulátorech je několikrát násobně větší. Nestíhaly impulsy nosné frekvence vypínat v dostatečně rychlé době. Mnohdy nevypínaly vůbec. Zatím co rychle spínací diody byly na tom lépe. Vysokofrekvenční diody ostáli na výbornou. Proto jsou také v modulátorech nejlépe využity.

## Literatura

- [1] PRCHAL, Josef. *Signály a soustavy*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987.
- [2] J. Vackář: *Amatérská měřicí technika*, Praha, SNTL 1990.
- [3] HEJL, Zdeněk, et al. *Amplitudová modulace* [online]. Pardubice: Hejl Zdeněk, 2004-2009 [cit. 2009-03-22]. Dostupný z WWW: <<http://modulace.godlike.cz/>>.
- [4] *WIKIPEDIA: Amplitude modulation* [online]. 2009 [cit. 2009-02-16]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Amplitude\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Amplitude_modulation)>.
- [5] *ELEKTRONIKA: TEORETICKÉ ZÁKLADY, PRAKTICKÁ ZAPOJENÍ* [online]. 2004 [cit. 2009-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://elnika.sweb.cz/>>.
- [6] *SCI-TOY: A simple AM transmitter* [online]. 2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://sci-toys.com>>.
- [7] *RBS FM: Balanced Modulator / Demodulator with MC1496* [online]. 2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://rbsfm.ej.am/>>.